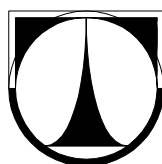


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Liberec 2010

**Michal Novák**

---

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: N 2612 - Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 - Mechatronika

## **Demonstrace možností pohonů Maxon**

## **The demonstration of Maxon drives possibilities**

### **Diplomová práce**

Autor: **Michal Novák**

Vedoucí práce: Ing. Josef Černožský, Ph.D.

**V Liberci 13. 5. 2010**



## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé DP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 13. 5. 2010

Podpis: .....

Michal Novák

## **Poděkování**

Chtěl bych na tomto místě poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Josefu Černohorskému, Ph.D. za poskytnuté informace, podnětné rady a připomínky, které mi předal v průběhu naší spolupráce.

Rovněž bych rád poděkoval rodině a všem, kteří mi pomáhali a podporovali mě nejen při zpracování diplomové práce, ale i během celého studia.

Liberec, květen 2010

Autor

## Anotace

Diplomová práce se zabývá návrhem, stavbou a programovou výbavou demonstračního mechanismu, jehož úkolem je předvedení možností malých elektrických pohonů firmy Maxon motor. Pro tuto názornou prezentaci je využito tří odlišných pohonů: A-max, EC-max a MCD.

Teoretická část obsahuje výčet vlastností vybraných produktů Maxon, kriteria pro stavbu a návrh koncepce celého aparátu s příslušnými výpočty potřebných parametrů.

Dále se práce zabývá tvorbou virtuálního 3D modelu a nezbytnou technickou dokumentací jednotlivých částí pro zajištění výroby. Následuje průřez realizací přístroje, a sice z pohledu mechanického i elektroinstalačního. Nezbytnou částí je také kapitola o vývoji programu pro řídicí jednotky elektromotorů. K tomu je využito speciálního software Epos studio, taktéž dodávaného firmou Maxon motor. V práci je uveden proces oživování, ladění procesních parametrů a rozbor dalších možných rozšíření aparátu.

Klíčová slova:

Elektronika, Elektrické pohony, Řízení, Maxon motor, EPOS Studio, Stejnosměrné elektromotory, Elektronická komutace, 3D modelování, Dimenzování, Prezentace, Programování

## **Annotation**

This diploma thesis deals with a projection, a construction and the software development of a mechanism, which is designed for demonstration of small electric motor drives of the Maxon motor company. Three different types of Maxon electric drives, A-Max, EC-Max and MCD, were used for the visual presentation.

The theoretical part contains a list of properties of selected Maxon products, criteria for the construction and the projection of a whole device, moreover relevant calculations of required parameters are also included..

Furthermore this diploma paper is concerned with a virtual 3D model creation and a technical documentation of single parts, which is necessary for external production. The next part of the thesis includes a mechanical and wiring realization and implementation of a mechanical and electrical solution. The most important part is the chapter of the software development for electric control units. For this a special software Epos studio, also supplied by Maxon motor, is used. Besides, setting the process of reviving, tuning process parameters and analysis of other possible extension apparatus are also mentioned in this thesis.

Key words:

Electronics, Electric drives, Control, Maxon motor, EPOS Studio, DC electromotors, Electronic communication, 3D modelling, Proportioning, Presentation, Programming

# Obsah

Úvod.....	9
1 Vlastnosti vybraných pohonů .....	11
1.1 Stejnoseměrné elektromotory .....	11
1.1.1 Řízení stejnosměrných elektromotorů .....	15
1.2 Elektromotor řady A - Max .....	17
1.3 Elektromotor řady EC - Max .....	19
1.4 Řídící jednotky EPOS.....	19
1.5 Kompaktní pohon MCD .....	21
1.6 Komunikační rozhraní .....	21
2 Koncepce prezentačního mechanismu.....	23
2.1 Nutné výpočty pro výběr motorů.....	24
2.2 Výběr vhodných komponent.....	26
2.3 Model mechanismu.....	27
2.3.1 Využití softwarového 3D modelování .....	27
2.3.2 Použití programu Google SketchUp .....	28
2.3.3 Tvorba dokumentace pro výrobu .....	29
3 Realizace .....	30
3.1 Mechanická instalace.....	30
3.1.1 Stavba rámu .....	32
3.2 Elektroinstalace .....	33
4 Vývoj řídicího programu .....	36
4.1 Uživatelský software EPOS Studio .....	36
4.1.1 Uživatelské prostředí OPENPCS.....	40
4.2 Struktura programu.....	41
4.2.1 Vývojový diagram .....	41
4.3 Testování a ladění programu .....	45
5 Možnosti rozšíření zařízení.....	46
5.1 Instalace napájecího zdroje.....	46



5.2	Možnosti poháněných elementů .....	47
5.3	Designové doplňky .....	47
Závěr .....		49
Seznam použitých zkratk .....		51
Seznam použité literatury .....		52
Seznam obrázků .....		54
Seznam tabulek .....		55
Obsah přiloženého CD .....		55
Příloha 1 .....		56
Příloha 2 .....		57
Příloha 3 .....		58
Příloha 4 .....		59
Příloha 5 .....		60
Příloha 6 .....		61
Příloha 7 .....		62
Příloha 8 .....		63
Příloha 9 .....		64
Příloha 10 .....		65
Příloha 11 .....		66

## Úvod

Švýcarská firma Maxon Motor AG je již více než 40 let známá výrobou stejnosměrných komutátorových motorů o výkonech do 250 W, motorů s elektronickou komutací EC o výkonech do 400 W, převodovek, zajišťovacích brzd, snímačů a řídicích jednotek rychlosti i polohy. Sídlo společnosti a jeden z výrobních závodů se nachází v Sachselnu ve středním Švýcarsku. Další výrobní závody jsou pak umístěny v Německu a Maďarsku. Společnost zaměstnává přes 1500 zaměstnanců po celém světě.

Její první výrobky, komutátorové motory, používaly samonosné vinutí bez železného jádra podle vlastního patentu. Toto vinutí dodnes dává motorům vlastnosti překonávající možnosti motorů s konvenční konstrukcí. Přestože doba života komutátorových motorů značky Maxon dosahuje při příznivém zatížení několika desítek tisíc hodin, firma rozšířila svou nabídku o motory s elektronickou komutací (motory EC). Jejich životnost ovlivňují pouze ložiska a vliv komutace se tedy neprojeví.

V České republice má výhradní zastoupení pohonů MAXON společnost UZIMEX. Právě jejím vedením byl vznesen požadavek na demonstrační zařízení, dokazující dynamické vlastnosti a přesnost polohování některých z nabízených motorů. Jelikož možnosti všech typů elektromotorů jsou jednoduše výjimečné - vždyť mnohé napovídá i použití pohonů této firmy v automatických sondách pro výzkum planety Mars, otevírá se zde široké pole možného využití. Autor byl nucen v první řadě získat u zadavatele informace o předpokládané rozsáhlosti projektu, výrobních omezeních atd. Na základě těchto dat byla zvolena koncepce využívající všech základních druhů stejnosměrných elektrických pohonů firmy MAXON. Jde o komutátorový DC motor, elektronicky komutovaný motor EC a kompaktní inteligentní pohon MCD. Na hřídele těchto elektromotorů byla upevněna trojice disků, opatřená čtyřmi symetricky umístěnými zářezy. Ty umožňují průnik ploch disků v okrajové části. Díky tomuto opatření je pro pohyb nutné zajistit přesně definované natočení. Právě pohony Maxon jsou schopny nabídnout dostatečné vlastnosti pro tuto aplikaci i při vyšší frekvenci otáčení.

Pro vlastní vývoj bylo nutné vytvořit podklady pro konstrukci podpůrných mechanických částí externím kovo zpracujícím subjektem. Spojení těchto částí tvoří kompaktní celek, do kterého jsou instalovány pohony a další elektronické komponenty.

Z důvodu poměrně komplikovaného vzájemného umístění komponent s vysokými nároky na přesnost se pro zajištění bezchybné výrobní dokumentace autor rozhodl vytvořit počítačový 3D model celého zařízení. Díky tomu bylo možné efektivněji odstranit nedostatky návrhu a snížit tak nejen náklady na výrobu, ale také náklady spojené s odstraňováním konstrukčních chyb.

Elektrické pohony firmy MAXON se vyznačují vysoce specifickými nároky na zapojení. Taktéž řídicí program bylo nutno vyhotovit ve speciálním software Maxon Studio. Program obsahuje smyčku úkonů provázaných pohonů a musí mimo jiné počítat s ošetřením poruchových stavů a autokalibrací.

Dále autor pojednává o možných rozšířeních projektu, mezi něž patří instalace napájecího zdroje či možnosti výměnných poháněných elementů a dalších funkčních i designových prvků.

Výsledkem práce je fyzický aparát plnící účel zadání, tedy demonstrující vynikající vlastnosti použitých pohonů v praxi, čehož lze využít ve výuce, prezentaci, atd.

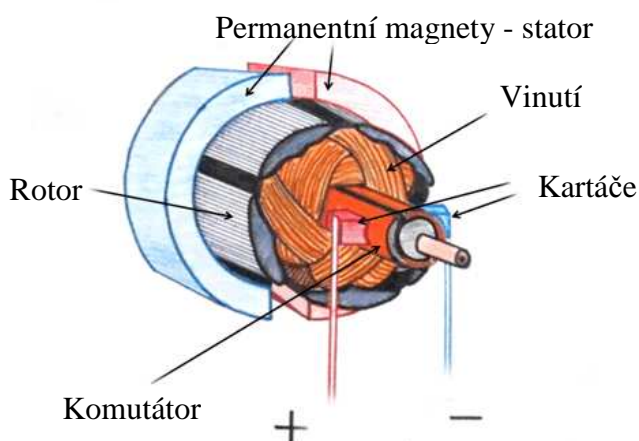
# 1 Vlastnosti vybraných pohonů

Jak bylo naznačeno v úvodu, použité pohony patří mezi světovou špičku v oblasti malých stejnosměrných motorů. Pro důkladnější seznámení s jejich principy a výhodami je nejprve nutné provést teoretický rozbor stejnosměrných motorů jako takových. V následující kapitole je tedy uveden průřez oblastí malých stejnosměrných motorů a dále specifikace pohonů Maxon, které jsou použity pro realizaci zadání.

## 1.1 Stejnosměrné elektromotory

Stejnosměrné motory se s oblibou používaly ve většině aplikací a i v dnešní době pro ně lze nalézt široké pole uplatnění. Jako první sloužily jak k výrobě elektrické energie (dynama), tak k její přeměně na energii mechanickou (motory). Jedná se o snadno řiditelné pohony, u kterých je možno regulovat otáčky pouhou změnou napětí na vstupu. Právě snadná regulace a široký rozsah otáček jsou stále jejich silnou předností. Navíc jsou hmotnostně i rozměrově menší než střídavé motory stejného výkonu. Stejnosměrný motor má vždy, při jakýchkoliv otáčkách, na výstupu mechanický moment přímo úměrný proudu procházejícímu motorem. [1. CHMELÍK, 2003, str. 35] Další příznivou vlastností je přímá úměrnost otáček bez zatížení na napětí.

Z mechanického hlediska jsou na statoru motoru umístěny permanentní magnety nebo budící vinutí, přičemž existuje sériové, derivační, případně smíšené zapojení těchto vinutí. Více informací lze získat např. v publikaci Elektrické stroje v energetice (viz. Seznam literatury). Motory s permanentními magnety se pak používají pro nižší výkony. Zjednodušený řez stejnosměrným motorem znázorňuje obrázek vpravo.

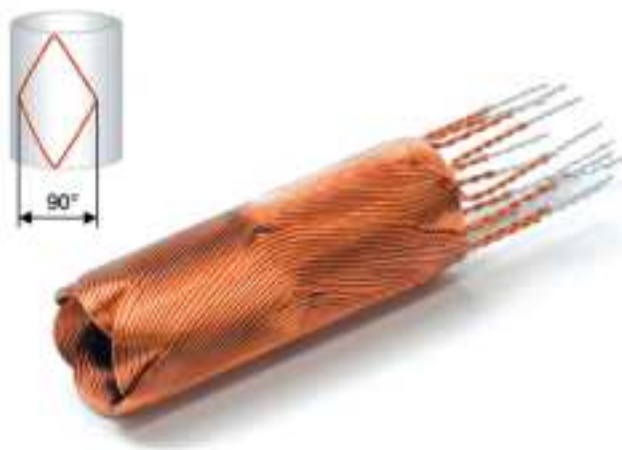


Obr.1: Zjednodušený řez stejnosměrným motorem. <sup>[2]</sup>

Vlastní pohyb a jeho kvalitní řízení umožňuje tzv. komutace, tj. přepojování proudu do sekcí vinutí podle natočení rotoru. Základem stejnosměrného motoru je tedy komutátor, což je v podstatě mechanický přepínač. Proud je na komutátor přiváděn přes tzv. kartáče, které mohou mít podobu grafitových špalků nebo kovových pásků. Kovové kartáče se používají u pohonů s rovnoměrným chodem, grafitové pak pro nekonstantní zatížení.

Právě mechanické řešení komutátoru je však zdrojem elektromagnetického rušení a také opotřebovávání kartáčů i samotného komutátoru, což do značné míry omezuje životnost motoru.

Základní rozdíl mezi stejnosměrnými kartáčovými motory maxon DC (direct current) a stejnosměrnými motory klasické koncepce je ve využití samonosného vinutí rotoru, které má Švýcarská společnost dokonce patentována. Vinutí znázorňuje následující obrázek.



Obr.2: Samonosné vinutí Maxon. <sup>[3]</sup>

Konvenční motory mají vinutí na železném jádru kotvy a permanentní magnety ve vnějším plášti motoru. Rozměrově i cenově výhodnější je řešení, u kterého je permanentní magnet uvnitř vinutí a plášť je z feromagnetického materiálu. Toto uspořádání je podmíněno použitím právě samonosného vinutí rotoru, v jehož dutině je umístěn stojící permanentní magnet. Siločáry magnetického pole tedy procházejí obvodovým pláštěm motoru, vzduchovou mezerou pro vinutí a nakonec jádrem v dutině uvnitř vinutí, které je na čele spojeno se statorem.

Vinutí u kartáčových motorů Maxon DC několikanásobně prodlužuje životnost komutátoru a kartáčů oproti motorům s klasickým vinutím. Životnost dosahuje při příznivých provozních podmínkách přes 10 000 hodin. Pro dosažení takových vlastností je použito kovových kartáčů ze slitiny drahých kovů (stříbro, paladium a měď) a mezi přívody segmentů vinutí jsou umístěny kondenzátory pro omezení jiskření (CLL - capacitor long life). [4. Uzimex, 2004, str.1]

Použití grafitových kartáčů by bylo pro tuto aplikaci nevýhodné. Doléhají totiž na válcový povrch komutátoru podstatně větší plochou než kovové kartáče a přenesou tedy vyšší proudy. Vyžadují ovšem větší přitlačnou sílu, což způsobuje vyšší mechanické brzdění rotoru a vyšší proud při běhu naprázdno. Grafitové kartáče se tedy používají v aplikacích s častými rozběhy a v provozu s častým krátkodobým přetížením.



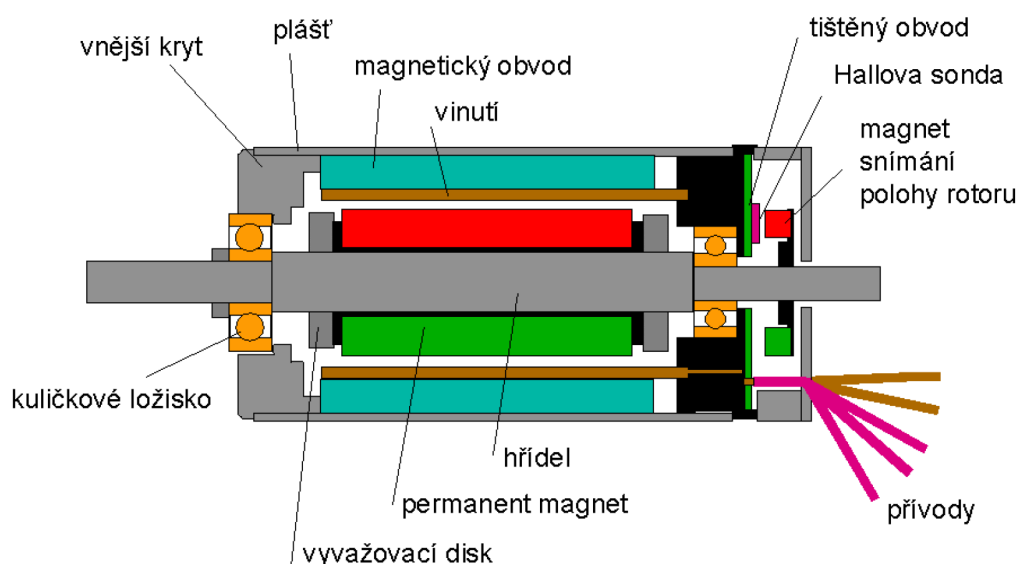
*Obr.3: Ukázka klasických komutátorů a grafitových kartáčů. [5]*

Ale zpět k pohonům Maxon DC. Samotné slitinové kartáče se během provozu nevyměňují, protože nejsou výrazným omezujícím článkem. S jejich opotřebením svou životnost zpravidla ztrácí mechanicky i komutátor a mazivo na jeho povrchu přichází o své mazací vlastnosti. Komutátor motorů Maxon s jedním vyvedeným koncem hřídele má velmi malý průměr, což přináší nízkou obvodovou rychlost a snížené opotřebení. Moment setrvačnosti rotoru je nižší o moment setrvačnosti jádra, takže i mechanická časová konstanta motoru je pouze několik ms až několik desítek ms, během kterých je

pohon schopen rozběhu na požadovanou rychlost. Ta se pohybuje v poměrně vysokých hodnotách kolem 15 000 ot/min, což představuje dvojnásobek až trojnásobek možností klasických stejnosměrných motorů. Např. motor DC s výkonem 150 W má průměr 40 mm. [4. Uzimex, 2004, str.1]

I přes nesporné výhody výše popisovaného pohonu Maxon DC vedla konstruktéry touha po odstranění komutátoru jako takového. To však umožnil až rozvoj elektroniky a výsledkem této snahy jsou elektronicky komutované (EC - electronic commutation) stejnosměrné motory. Nejprve našly uplatnění v aplikacích, ve kterých bylo zapotřebí stálých otáček, pro něž byl motor navržen. Za zmínku stojí např. ventilátory nebo pohony páskových audio/video zařízení. Zpravidla šlo o koncepci tzv. rotujícího statoru - tedy vnější část se otáčela a vnitřní byla upevněna k podstavě.

Stejnoseměrné válcové bezkartáčové motory Maxon EC zachovávají dynamické vlastnosti motorů DC i jejich rozměry. Vinutí je však umístěno ve statoru a rotor je tvořen permanentním magnetem ze vzácných zemin (NeFeB). Komutace neprobíhá mechanickou vazbou přes lamely komutátoru, ale elektronickými spínacími prvky na základě informací o aktuálním úhlu natočení rotoru. Tato informace je získávána ze tří Hallových sond, které jsou umístěny na statoru a jsou spínány permanentním magnetem rotoru, případně speciálním magnetem určeným k tomuto účelu.



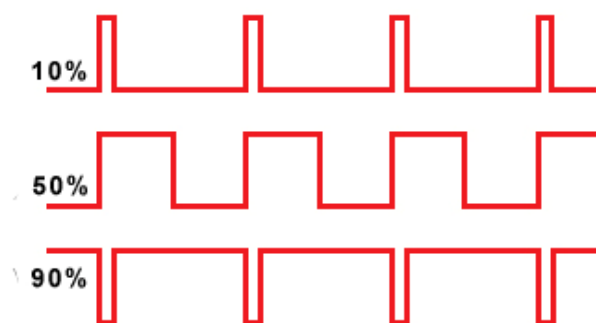
Obr.4: Řez elektronicky komutovaným stejnosměrným elektromotorem. [6]

Absence komutátoru posunuje životnost motoru na dobu použitelnosti kuličkových ložisek, tj. několik desítek tisíc hodin. Motor je vhodný pro nepřetržitý provoz s proměnnou rychlostí i zatížením. Nejvyšší rychlost dosahuje několika desítek tisíc ot/min, neboť není omezena komutátorem. Pro aplikace s nižší rychlostí se pak využívá různých typů převodovek. [7. Uzimex, 2003, str. 1]

### 1.1.1 Řízení stejnosměrných elektromotorů

Zjednodušeně lze říci, že regulace dc motorků je možná několika způsoby. Prvním z nich je řízení napětí kotvy, dále pak řízení buzení - změna budícího proudu vinutí. U složitějších strojů je možná kombinace obou předcházejících možností. V některých případech se využívá i různých odboček v budícím vinutí. U jednodušších motorků s permanentními magnety se regulace provádí změnou jmenovitého napětí. Rychlost motoru bez zatížení je totiž přímo úměrná napětí. Každý Nm zatížení ji sníží o konstantní úbytek. Pro otáčky naprázdno tedy platí vztah  $n = k \cdot U$ , kdy  $n$  jsou otáčky hřídele [ot/min],  $k$  je konstanta rychlosti [ot/V] a  $U$  je hodnota vstupního napětí [V]. Pro moment platí obdobný lineární vztah, avšak v závislosti na proudu. Tedy  $M = k \cdot I$  ( $M$  – moment [Nm],  $k$  – momentová konstanta [Nm\*A],  $I$  – proud [A]).

Další možností regulace je využití tzv. pulsně šířkové modulace (PWM - pulse width modulation). Jedná se o regulaci využívající změny šířky proudového impulsu do motoru, čímž se liší od klasické spojité regulace proudu, kde nedochází pouze ke snižování proudu, ale i napětí. Při pulzní regulaci zůstává proud i napětí stejné, ale mění se doba kdy prochází proud motorem. Takto regulovaný motor má větší sílu i při nižších otáčkách. Protože výkonové spínací prvky regulátoru jsou buď zcela otevřeny, nebo zavřeny a nevznikají na nich téměř žádné ztráty. Výkonové stupně většiny řídicích jednotek Maxon používají řízení napětí pulsně šířkovou modulací PWM.

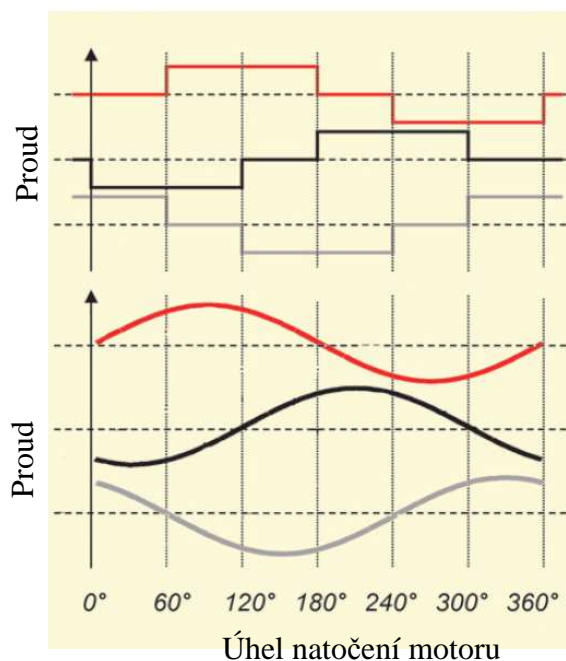


Obr.5: Znáznornění průběhu PWM.



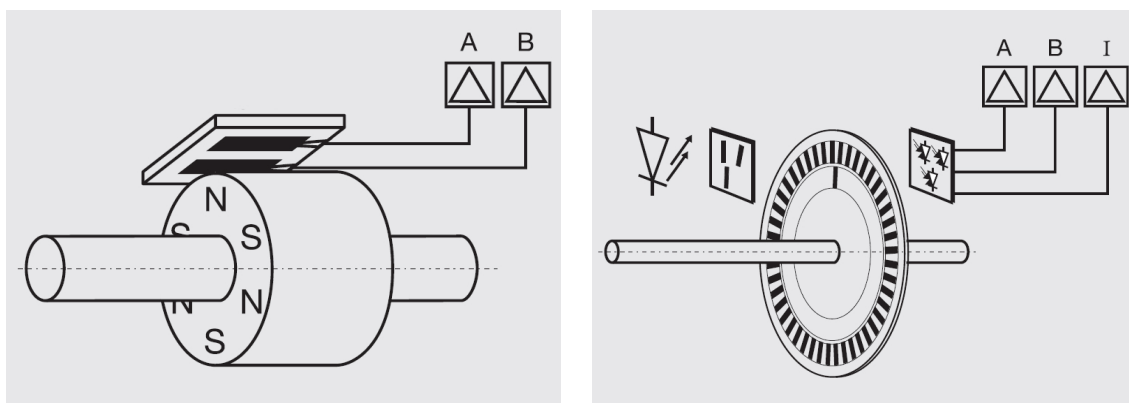
Zatímco u komutátorových DC motorů se informace o úhlu natočení získává mechanickým spojením lamel komutátoru s přívody cívky, v případě elektronicky komutovaných motorů je informace o úhlu natočení získávána ze snímače se třemi Hallovými sondami. Potřebná je tedy i řídicí jednotka, která spínáním správných vinutí statoru zajistí optimální úhel mezi magnetickým polem statoru a magnetickým polem rotoru. Existuje ještě další řešení bez použití snímače. V takovém případě řídicí jednotka vyhodnocuje informaci o průběhu indukované elektromotorické síly v některé z cívek. K získání této informace je ale nutné, aby se rotor otáčel. Rozběh se realizuje impulsem, který však může způsobit i pootočení na opačnou stranu. Pokud však aplikace vyžaduje minimum rozběhů, ale spíše konstantní vysoké otáčky, je tento způsob komutace velice kvalitní.

Jak mechanická komutace, tak obě výše uvedené elektronické komutace pracují s obdélníkovým průběhem proudu, který má nevýhodu v asi 14% nerovnoměrnosti mechanického momentu. Pro docílení rovnoměrného mechanického momentu, zvláště při nízkých rychlostech otáčení, je výhodné použití sinusového proudového průběhu. Aby byla řídicí jednotka schopná řídit průběh generovat, je potřeba informaci z Hallova snímače doplnit o signál z inkrementálního snímače, čímž je získáno tolik potřebné vyšší rozlišení úhlu otočení. [7. Uzimex, 2003, str. 1]



Obr.6: Obdélníkový a sinusový průběh proudu do vinutí.<sup>[7]</sup>

Inkrementální snímače, používané jako doplňky k motorům Maxon, pracují buď na magnetickém, nebo optoelektronickém principu. Následující obrázky zobrazují schématická uspořádání obou principů.



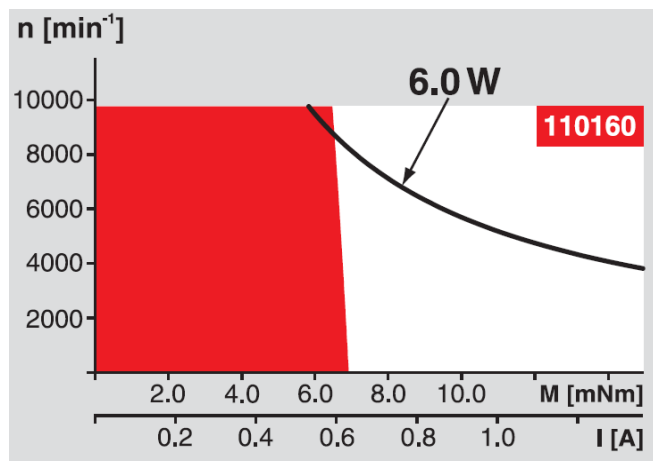
Obr.7: Schéma magnetického a optoelektronického inkrementálního snímače. [8]

Magnetický snímač využívá změnu elektrického odporu materiálu NiFe v tenké vrstvě se směrem magnetického pole vzhledem ke směru proudu ve vrstvě. Výstupem čidla jsou dva fázově posunuté kanály a referenční signál s jedním pulsem za otáčku hřídele, tzv indexem. V optoelektronickém snímači je zabudována LED, která emituje světlo skrze precizně vytvořené otvory v obvodové části disku, který je připevněn na hřídeli motoru. Proniklé světlo je detekováno fototranzistorem, který pak vytváří elektrický signál pro řídicí obvod. Všechny polohovací systémy Maxon vyhodnocují náběžnou i sestupnou hranu signálu. Tím je získán čtyřnásobek přesnosti polohy ku počtu pulsů enkodéru na otáčku. Tato hodnota je označována jako qc (quadcounts). [8. Maxon, 2008, str.32]

## 1.2 Elektromotor řady A - Max

Jak již bylo řečeno, k realizaci zadání bylo použito tří stejnosměrných motorů Maxon. První a nejmenší typ nese označení A-Max 22. Jde o vysoce kvalitní DC motor využívající patentovanou technologii samonosného vinutí. Jmenovité napětí je 12V a výkon činí 6W. Motor dosahuje maximální hodnoty momentu rovné 6,8 mNm.

Maximální rychlost otáčení je 9800 ot/min. Výkonová křivka je na následujícím obrázku, přičemž červené pole znázorňuje provozní oblast a bílé pole oblast krátkodobého přetížení. [8. Maxon, 2008, str.114]



Obr.8: Výkonová křivka motoru A-Max 22.<sup>[8]</sup>

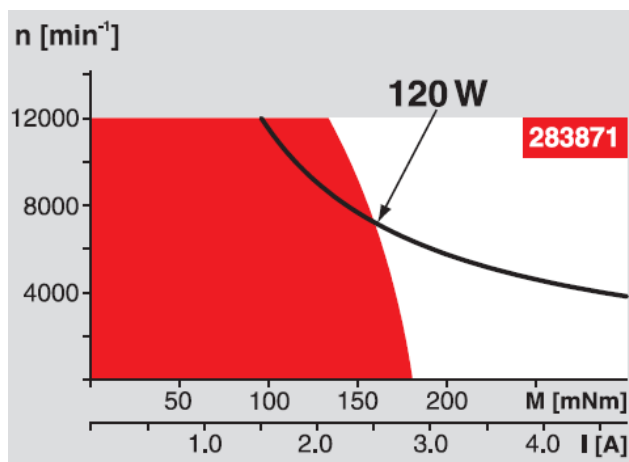
Motor je vybaven inkrementálním snímačem typu MR-M, který poskytuje rozlišení polohy 512 pulsů na otáčku. Snímač je spojen s motorem a tvoří tak kompaktní celek (viz. Obr. 9).



Obr.9: Motor A-Max s rozloženým inkrementálním snímačem.<sup>[8]</sup>

### 1.3 Elektromotor řady EC - Max

Druhým pohonem, použitým při realizaci zadání, je elektronicky komutovaný motor řady EC – Max 40. Jde o 120W pohon o nominálním napětí 48V, maximálním momentu 183 mNm a maximálních otáčkách 1200 ot/min. Výkonovou křivku opět znázorňuje obrázek níže. [8. Maxon, 2008, str.180]



Obr.10: Výkonová křivka motoru EC – Max 40.<sup>[8]</sup>

Tento motor je vybaven inkrementálním snímačem typu MR-L, který poskytuje rozlišení polohy 500 pulsů na otáčku. I tento snímač je spojen s motorem a tvoří tak kompaktní celek.

### 1.4 Řídící jednotky EPOS

4 – kvadrantové řídící jednotky polohy EPOS (easy to use positioning systém) jsou určeny k řízení DC i EC motorů Maxon. Umožňují regulovat rychlost, moment i polohu osy. Systém je koncipován tak, že každý motor musí být vybaven odpovídající řídící jednotkou. Ty jsou vyráběny v různých provedeních, odlišujících se od sebe maximálním přípustným napájecím napětím a maximálním výstupním proudem do motoru. Dalším rozdílem je možnost rozšíření o procesor a další paměti pro řídící program. Tyto konfigurace jsou označovány písmenem P (EPOS P) a umožňují provoz bez závislosti na řídícím PC. U všech typů je využívána PWM modulace.

Pro řízení DC motoru A – Max 22 je využita jednotka EPOS 24/1, která umožňuje regulaci DC i EC motorů až do výkonu 20W. Jednotka má operační napájecí napětí v rozmezí 9 - 24V.



Obr.11: Řídící jednotka EPOS 24/1.<sup>[8]</sup>

Pro řízení EC motoru EC - Max 40 je využita nová jednotka EPOS2 50/5, která umožňuje regulaci DC i EC motorů až do výkonu 250W. Napájecí napětí je možno zvolit v rozmezí 11 – 50V.



Obr.12: Řídící jednotka EPOS2 50/5.<sup>[8]</sup>

Další parametry řídicích jednotek jsou uvedeny v katalogových listech v příloze, případně v katalogu výrobků maxon (viz. Seznam literatury).

## 1.5 Kompaktní pohon MCD

Třetím a posledním pohonem, využívaným v aplikaci dle zadání, je tzv. inteligentní pohon MCD. V kompaktním pouzdře je umístěn motor EC – Max 30 o výkonu 60W, magnetický inkrementální snímač s 1000 pulsy na otáčku a řídicí jednotka. Na zadním čele pouzdra jsou pouze dva konektory. Na patnáctipólový signální konektor lze připojit vstupy a výstupy související se snímači a signalizací řízené soustavy. Devítipólový konektor se využívá k připojení napájecího napětí 12 – 50 V DC a komunikačních kabelů CANbus a RS232. Motor EC-max 30 má jmenovité napětí 24 V a trvalý moment 54 mNm při 5,000 ot/min. Nejvyšší rychlost motoru je 12,000 ot/min. Rychlost motoru je však závislá na velikosti napájecího napětí (tak je tomu i u ostatních jednotek) a bez zatížení dosahuje při napájení 24V zhruba 8000 ot/min. Vyšší rychlosti dosáhneme vyšším napájecím napětím.



Obr.13: Řez pohonem MCD.<sup>[8]</sup>

## 1.6 Komunikační rozhraní

Řídicí jednotky jsou samozřejmě schopny komunikace s řídicím PC i mezi sebou navzájem. Pro nastavování a ovládání osobním počítačem se využívá sériové sběrnice RS232. U nových jednotek se lze setkat i s USB (universal serial bus) portem. Těmito způsoby je však možno připojit pouze jednu řídicí jednotku, s čímž v některých

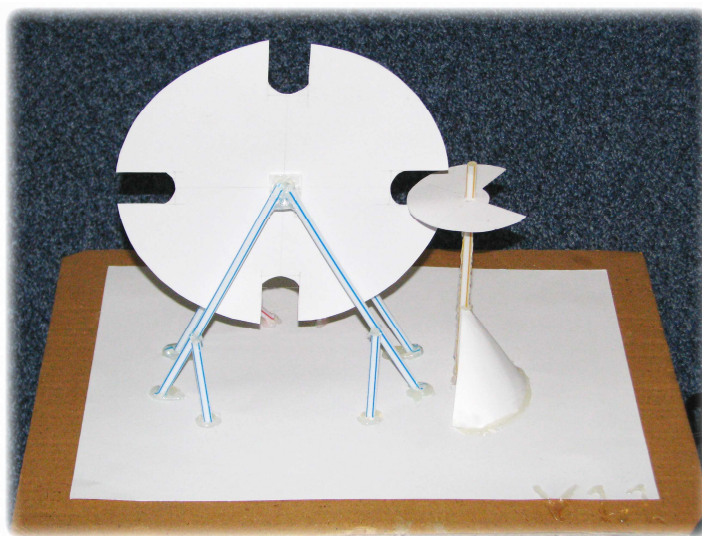
aplikacích nelze vystačit. Pro komunikaci více zařízení je tak využíváno komunikačního rozhraní standardu CANBus, kterým jsou všechny jednotky vybaveny. Na tuto komunikační sběrnici lze připojit až 127 zařízení, přičemž komunikace mezi nimi probíhá na základě znalosti jedinečného identifikačního čísla, které lze mechanicky nastavit přímo na jednotlivých jednotkách.

CAN (controller area network), je velmi zdařilá sériová multiplexní komunikační sběrnice se schopností dosahovat vysokých přenosových rychlostí při zachování vysokého stupně zabezpečení přenosu dat, pro kterou byla vyvinuta řada komunikačních protokolů. Patrně nejzdařilejším je vyšší komunikační protokol CANOpen, který využívají i jednotky EPOS. Jedná se o široce konfigurovatelnou aplikační vrstvu pro vestavné řídicí sítě pro stroje a zařízení. [9. hw.cz, 2006]

## 2 Koncepce prezentačního mechanismu

Po analýze zadání bylo nejprve zapotřebí získat informace o představách zadavatele, tedy společnosti Uzimex. Schůzka s vedoucími představiteli proběhla u příležitosti Mezinárodního strojírenského veletrhu v Brně, kde firma prezentovala svůj sortiment. Ze strany společnosti byl vznesen požadavek na zařízení, které by jednoduše a názorně ukazovalo možnosti pohonů Maxon. Důležitou roli sehrála i Technická Univerzita v Liberci, jelikož bylo uvažováno použití zařízení při výuce. Měl tedy vzniknout aparát se širokou paletou možných úprav pro výuku, vysokou mírou prezentace-schopnosti a jehož výroba by zároveň nepřesahovala určitou finanční mez.

Z prvotních nápadů zvítězila koncepce využívající perforovaných disků, kdy jeden je při rotaci závislý na poloze druhého. Celý návrh vznikl formou náčrtů, a pro lepší představu a možnost úvahy nad klady a zápory zvolené koncepce byl zhotoven fyzický model, který je zobrazen na obrázku 14.



*Obr.14: Prvotní model navrhovaného zařízení.*

Na základě tohoto modelu mohlo dojít k rozboru vhodnosti koncepce a přejít k myšlence o způsobech realizace. Jelikož zařízení mělo plnit také estetickou stránku, bylo rozhodnuto o designové změně konceptu, a to použití tří disků stejných rozměrů. Pro zdánlivě snadnou výrobu byl zvolen rozměr standardního CD (compact disc), tedy průměr 120 mm se středovým otvorem o průměru 15 mm. Do CD měly být ve všech



čtvrtinách obvodu vhodným způsobem vytvořeny výřezy, jejichž rozměry měly na jednu stranu umožňovat pokrytí určitého tolerančního pole pro pohyb disků, ovšem na stranu druhou měly názorně demonstrovat přesnost polohování motorů.

## 2.1 Nutné výpočty pro výběr motorů

Po další práci bylo nejdříve nutno spočítat moment setrvačnosti kompaktního disku. Tato fyzikální veličina vyjadřuje míru setrvačnosti tělesa při otáčivém pohybu a je vyjádřena následujícím vztahem:

$$J = \int_m r^2 dm \quad (2.1.1)$$

kde  $r$  je vzdálenost elementu hmotnosti  $dm$  od osy rotace. Integrace se provádí přes hmotnost celého tělesa, přičemž předpokládáme, že rozložení látky v tělese je spojitě. Velikost momentu setrvačnosti závisí tedy na rozložení hmotnosti a na poloze rotační osy vzhledem k tělesu. Čím dále od osy rotace je hmotnost v tělese rozložena, tím větší je moment setrvačnosti. Upravený vztah pro výpočet momentu setrvačnosti disku – válce – je:

$$J = \frac{1}{2} m r^2 \quad (2.1.2)$$

hmotnost CD:  $m = 18g$

poloměr CD:  $r = 120mm$

$$J = \frac{1}{2} 18 \cdot 10^{-3} \cdot (120 \cdot 10^{-3})^2 = 0,0324 gm^2$$

Moment setrvačnosti podle výše uvedeného vztahu je tedy  **$J = 0,0324 gm^2$** .

Jelikož výběr pohonů měl být rozmanitý co do typu i výkonu, bylo rozhodnuto užít CD pouze pro motor A-Max. Pro 120W EC motor byl použit disk nerezový a pro

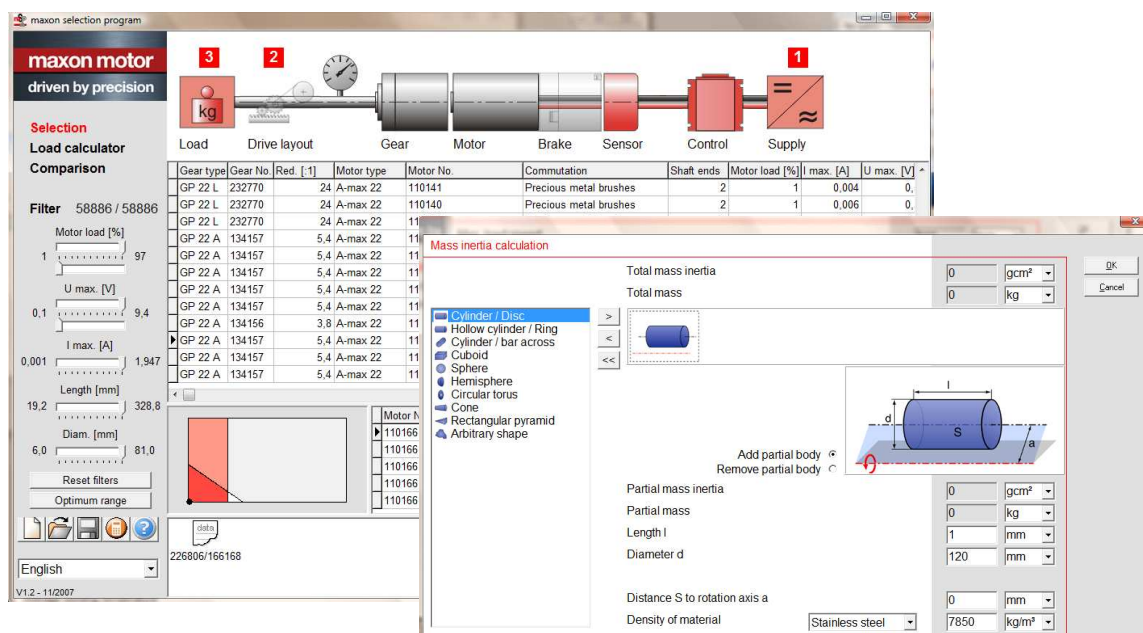
pohon MCD disk z hliníku. Pro tyto materiály je výpočet identický s výše uvedeným. Protože ale v době návrhu disky nebyly ještě vyrobeny, bylo zapotřebí hmotnost spočítat pouze teoreticky z rozměrů a hustoty materiálu. Tedy:

Hliník		Nerez
r =	0,12m	0,12m
v =	0,001m	0,001m
$\rho$ =	$2700\text{kgm}^{-3}$	$7850\text{kgm}^{-3}$
m =	30,54g	88,78g
<b>J =</b>	<b><math>0,05497\text{gm}^2</math></b>	<b><math>0,1598\text{gm}^2</math></b>

*Tab.1: Hodnoty a výpočet momentů setrvačnosti disků.*

Středový otvor byl při výpočtech zanedbán. Jednak jsou jeho rozměry poměrně malé vůči průměru disku a za další byla v blízkosti osy plánována další hmota v podobě unášedce, sloužícího k připevnění disku k hřídeli motoru. Ten nebyl v době návrhu blíže specifikován. Obvodové výřezy byly taktéž zanedbány. Jejich započtením nevznikne nijak extrémně patrná odchylka. Při výběru pohonu byl kladen důraz na patřičné předimenzování, díky kterému by případné odchylky nevedly k nedostatečnému výkonu motorů.

Pro vlastní výběr vhodného pohonu lze využít software Maxon selection program. Tato aplikace umožňuje zadání parametrů navrhované úlohy a výběr požadovaných komponent (převodovka, enkodér, brzda, atd.). Ovládání je zdařilé a intuitivní. Obrázek na následující straně znázorňuje výběr pohonu A-Max s výpočtem momentu setrvačnosti.



Obr.15: Náhled softwaru MSP.

## 2.2 Výběr vhodných komponent

Na základě získaných dat byly po konzultaci se zástupcem firmy Uzimex vybrány pohony, řídicí jednotky a potřebná kabeláž. Seznam je uveden v příloze této práce.

Další neznámou byl způsob uchycení disku o tloušťce 1mm k hřídelím motorů. Po zavrnutí více či méně vhodných řešení bylo rozhodnuto použití vrtulových unášeců pro letecké modelářství. Tyto se vyrábějí v mnoha provedeních, lišících se hlavně velikostí kleští pro hřídel motoru a celkovým dimenzováním podle přenášeného výkonu. Pro aplikaci s výše uvedenými motory Maxon, byly vybrány tři rozměry pro průměry hřídele 2mm, 4mm a 6mm.



Obr.16: Unášec pro upnutí disku na hřídel.

Dále bylo třeba zadat objednávku na výrobu základní desky, na níž se přimontují jednotlivé komponenty budoucího aparátu, výrobu disků a kovových podstav, na které by bylo možno pohony upevnit.

## **2.3 Model mechanismu**

Koncepce zařízení klade veliké nároky na souosost a přesnost provedení podstav. Získat správné parametry v případě, že výslednou polohu disků a jejich zářezů ovlivňuje mnoho faktorů, není zcela triviální úloha. Pokud se mají disky protínat v zářezích s tolerancí  $\pm 1\text{mm}$ , je na prvním místě třeba zjistit body umístění podstav motorů na základní desce a dále samotné podstavy musí svírat správné úhly - jelikož osy pohonů nejsou umístěny v pravoúhlém smyslu. Je také nutno počítat s pružností materiálu podstav při rychlých změnách otáček. Pro jemné doladění výsledných poloh lze počítat pouze s posouváním unášeců po hřídelích. Tato akce však nedává příliš široké možnosti změn. Pro lepší představu a pochopení problému mělo smysl zhotovit model zařízení.

Modelování neboli simulace je často používanou metodou v odborné praxi. Výhoda této metody spočívá v tom, že lze s relativně nízkými náklady zjistit chování modelovaného objektu. V tomto případě je modelování cennou pomůckou k ověření realizovatelnosti a dobrým výchozím bodem pro tvorbu dokumentace pro výrobu. [10. KŘIVÝ, KINDLER, 2001, str. 15]

### **2.3.1 Využití softwarového 3D modelování**

Vytvoření fyzického modelu zařízení by však v tomto případě bylo příliš nákladné v porovnání s výrobou skutečného aparátu, přičemž by zanikal vlastní smysl této metody. Skvělou alternativou je však použití virtuálního modelování ve vhodném software.

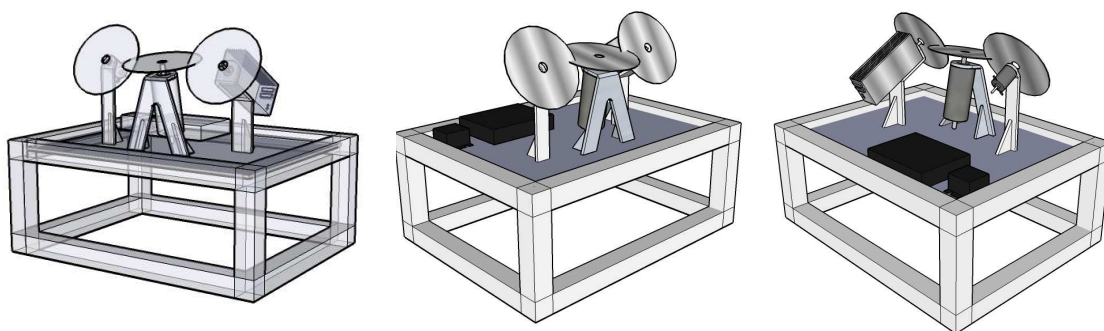
Programů pro modelování je celá řada od méně zdařilých až po profesionální nástroje, jejichž problém ovšem tkví v nutné znalosti složitého ovládání programu a nákladech za licenci. Autor však použil nástroj plně dostačující k požadovanému úkolu

a přitom za podmínek volné licence - tzv. freeware. Program nese název Google SketchUp. Společnost Google ke svému produktu uvádí:

*„Google SketchUp je software, který můžete použít pro tvorbu, úpravu a sdílení 3D modelů. Naučíte se ji používat snáze než jiné programy pro 3D modelování. Ať již chcete navrhnout novou část vašeho domu, vytvořit modely pro aplikaci Google Earth nebo vyučovat geometrii žáky v páté třídě, můžete aplikaci SketchUp použít pro zobrazení vašich nápadů ve 3D. A když jste hotovi, můžete exportovat obrázek, vytvořit film nebo vytisknout náhled vaší práce.“ [11. Google, 2009]*

### 2.3.2 Použití programu Google SketchUp

Po seznámení s ovládáním programu bylo možno zahájit modelovací proces. Výchozím bodem bylo umístění a vzájemná orientace tří disků, ke kterým pak mohly být „připojeny“ jednotlivé motory. Koncepce vrtulových unášeců se ukázala být principiálně vhodná, avšak bylo nutno počítat s úpravami, pro něž bylo třeba vyrobit nezbytné součástky. Dále byly navrženy podstavy pohonů. Jelikož má však každý jiné rozměry a způsob uchycení, musela být tato skutečnost promítnuta v návrhu. U motoru MCD bylo při návrhu držáku bráno v úvahu namáhání na ohyb, způsobené výrazným posunutím těžiště od místa uchycení. Zvolená koncepce zajišťuje minimální namáhání a dostatečnou stabilitu. Krom funkce upevnění byl požadavek i na designovou stránku návrhu. Zbývalo již jen vytvoření rámu, do kterého se měla umístit základní deska s namontovanými komponenty. Výsledek činnosti v modelovacím software je zobrazen na obrázku 17.



Obr.17: Virtuální model zařízení.

### **2.3.3 Tvorba dokumentace pro výrobu**

Výrobní dokumentace byla vytvořena na základě virtuálního modelu. Jelikož program Google SketchUp umožňuje základní kótování a model byl kreslen v měřítku M1:1, byla tato činnost velmi zjednodušena. K vytvoření vlastních výkresů byl použit program AutoCAD 2008 společnosti Autodesk. Výrobní dokumentace je součástí přílohy této práce.

### 3 Realizace

Vlastní stavba zařízení byla zahájena po získání téměř všech komponent. V první fázi šlo o úpravy dílů kvůli zajištění správných poloh, umožnění montáže a přípravu pro kabelové instalace. Další postup byl zaměřen na úpravu povrchů pro splnění estetických požadavků. Nakonec bylo pro dokončení nutno vytvořit vhodný rám pro usazení panelu s motory. Po mechanických pracích šlo již pouze o zapojení kabelových svazků.

#### 3.1 Mechanická instalace

Dodaná základní deska o rozměrech 400x300mm byla zhotovena z hliníkového plátu o tloušťce 6mm. Toto provedení bohatě splňuje nároky na pevnost, ale zároveň snadnou obrobitelnost. Po zkušebním osazení a upřesnění rozmístění prvků bylo totiž nutno vytvořit celou řadu otvorů pro uchycení držáků, průchod kabelů a instalaci šroubových spojů. Tato operace musela být provedena manuálně. Výhodnější by samozřejmě bylo vyříznutí těchto otvorů laserem či podobnou technologií, ale podklady pro takovou operaci nemohly být vytvořeny před zadáním výroby. Virtuální model sice umožňuje navrhnout i tyto body, ale např. pro umístění otvorů pro kabely je v tomto případě nutno počítat s mechanickými vlastnostmi kabelů, zejména jejich ohebností, s kroucením apod. Z tohoto důvodu bylo manuální dokončení nevyhnutelné.

Úchyty motorů byly zhotoveny z nerezového plechu tloušťky 3mm a u podstavy vybaveny pomocnými vzpěrami pro zajištění dostatečné pevnosti. Zvláště zrychlení 120W EC motoru s těžkým nerezovým diskem vyvine při rozběhu značný ráz, který z důvodu dodržení tolerancí nemůže být kompenzován pružností materiálu. Proto také tento motor má robustní, zdvojenou podstavu.

Hliníkové disky byly vyrobeny na laserovém řezacím stroji, zajišťujícím vysokou přesnost. U těchto rotujících komponent je z důvodu vyvážení nezbytně nutné dodržení přesných rozměrů. V případě i malé odchylky by mohlo snadno docházet k vibracím, přílišnému namáhání ložisek motorů a v nejhorším případě ke střetu rotujících disků, což by při otáčkách v řádu tisíců ot/min mělo destruktivní účinky.

K úspěšné kompletaci bylo také zapotřebí upravit vrtulové unášeče. Jelikož jsou určeny pro upevnění vrtule, jejíž středová část má mnohem větší tloušťku než disky o tloušťce 1mm, bylo zapotřebí některé části přesoustružit, případně nahradit částmi novými, vyrobenými soustružnickým obráběním hliníkových kulatin. Na přesnost unášečů byly také kladeny vysoké nároky ze stejného důvodu jako u disků, tedy kvůli přesnému usazení disků z důvodu vyvážení. Původní matice byly nahrazeny estetičtějšími maticemi kloboukovými.

Upevnění podstav k základní desce bylo realizováno vyvrtáním děr do jejich spodních hran. Tyto díry byly vybaveny závitem M3 a pomocí šroubů dotaženy k desce. Pro vizuální dokončení a zajištění předimenzovaného spoje byl použit dvanáctiminutový dvousložkový epoxid NHP, který má po vytvrzení výhodu v možné obrobiteľnosti a přelakovatelnosti. V této fázi, kdy byly zafixovány polohy motorů, mohlo být také zahájeno testování funkce a programování řídicích jednotek. Stav rozpracovanosti znázorňuje obrázek vpravo.



*Obr.18: Aparát ve stádiu rozpracování.*

Pro dokončení panelu byly veškeré povrchy dále upraveny broušením za mokra pomocí smirkového papíru a nabarveny akrylovým autolakem různých odstínů. Upevnění motorů k držákům a připevnění řídicích jednotek je realizováno šroubovými spoji M3. Pro úspěšné provedení mechanických prací čerpal autor z vlastních zkušeností, případně z publikace Dílenská cvičení II (viz. Seznam literatury).



### 3.1.1 Stavba rámu

Jelikož po dokončení obsahuje zařízení velké množství poměrně objemných kabelů a byla uvažována integrace napájecího zdroje, bylo nutno realizovat rám, který by tyto podpůrné komponenty jednak ukryl a jednak zvýšil stupeň vizuální dokonalosti. Při výběru vhodného způsobu výroby byla také brána v úvahu nutnost zajištění dokonalého usazení základní desky. Pokud by panel nebyl dostatečně upevněn, pohyboval by se vlivem slabých vibrací po podložce z důvodu nevyváženosti poháněné soustavy, a to i přes úzkostlivé vystředění disků. Tato skutečnost se potvrdila během testů s rozpracovaným aparátem.

Nejvhodnější, nejestetičtější a přitom cenově dostupné řešení bylo nalezeno v použití hliníkových profilů.

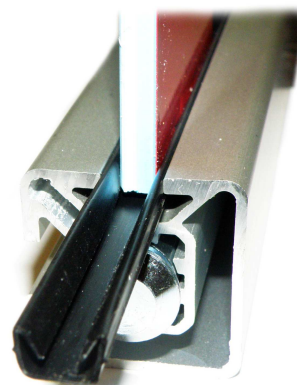
Hliníkové profily ke stavbě nejrozličnějších jednoúčelových strojů a zařízení. Většina dodavatelů nabízí ucelený sortiment tzv. stavebnicového systému. Základem jsou přesné eloxované hliníkové profily s podélnými drážkami, vyráběné metodou průtlačného lisování, vybavené otvory pro upevnění spojovacích prvků. Povrchové plochy jsou odolné proti korozi a poškrábání. Sortiment obsahuje nespočet variant a příslušenství. Koncepce systému umožňuje velkou pružnost, vysokou přesnost i pevnost, ale také rychlou přestavitelnost a možnost opakovaného použití prvků systému.

Pro stavbu rámu byly použity hliníkové profily firmy MayTec o rozměru 30x30mm a pro viditelné hrany byl zvolen speciální typ se zaoblením. Objednávka zboží a příprava ke stavbě (řezání, vrtání montážních otvorů, atd.) byla provedena společností Moas cs s.r.o. se sídlem v Lučanech nad Nisou. Výpočet rozměrů a příprava dokumentace pro objednávku byly vytvořeny na základě virtuálního modelu s ohledem na prostorové potřeby a výškové omezení celého aparátu (pro případ umístění do vitríny).

Samotná stavba následně probíhala smontováním jednotlivých dílů. Vzhledem ke skutečnosti, že se ke spojování profilů používá systém šroubů, vnikajících do kuželového otvoru (viz. Obr 19), což snižuje estetičnost smontovaného celku, byl návrh proveden tak, aby maximum spojů byl směřován do vnitřního prostoru. Vedlejším účinkem byla komplikace při stavbě, přesněji existence pouze jedné posloupnosti montážního procesu.



*Obr.19: Konektor pro spojování hliníkových profilů.*



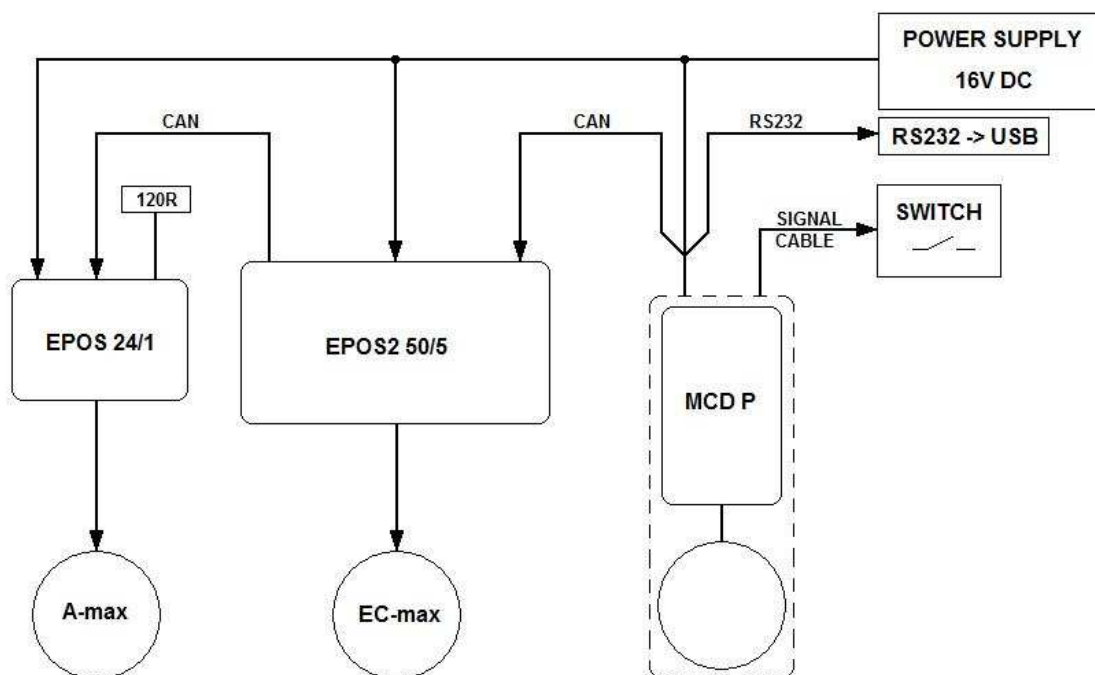
*Obr.20: Použití vymezovací lišty.*

Pro zasazení základní desky a bočnic do drážek profilů se využívají speciální plastové lišty, který vymezují vůle mezi montovanými díly (viz. Obr. 20). Bočnice byly vyrobeny z plastové desky a potaženy samolepící folií červené barvy v odstínu loga společnosti Maxon motor.

Hotový celek překonal veškeré představy. Vzhled rámu umocnil míru prezentace-schopnosti zařízení a pevnost spojů zajistila více než dostatečné vlastnosti pro eliminaci vibrací a nežádoucích pohybů.

### **3.2 Elektroinstalace**

Do v podstatě již hotového aparátu byly posléze umístěny veškeré kabely, nutné pro provoz. Zapojení znázorňuje schéma na další straně.



Obr.21: Schéma zapojení.

Všechny jednotky jsou napájeny ze společného externího zdroje napětí. Pro EPOS2 a MCD lze použít dodávané kabely, opatřené příslušnými konektory. U jednotky 24/1 je připojení zajištěno svorkovnicí. Pro CAN sběrnici se opět používají dodávané kabely a je potřeba zajistit zakončení linky pomocí terminátoru, tedy rezistoru o hodnotě 120 Ohm. Pro připojení motoru A-max slouží k tomu určený desetikilový kabel, který zajišťuje jak napájení, tak i přenos dat z enkodéru. Motor EC-max je vybaven také desetikilovým kabelem z enkodéru, ale napájení a signál z Hallova snímače jsou přenášeny vlastními svazky kabelů, zakončenými konektory. Signálový vodič z MCD je vyveden na přepínač, který umožňuje zahájení a ukončení programu. Sběrnice RS232 je vyvedena z jednotky MCD a pomocí redukce RS232 -> USB může být připojena k PC. Jednotka EPOS2 je sice vybavena přímo USB konektorem typu B, avšak plně fungující komunikaci se v této konfiguraci nepodařilo navázat a ani zadavatelem práce nebylo toto řešení doporučeno.

Napájecí napětí pro jednotku MCD je 12 - 50V, pro EPOS2 je to 11 - 50V a pro jednotku 24/1 pak 9 - 24V. Z toho plyne, že pokud má být využito jedné hodnoty napájecího napětí, musí tato hodnota být z rozmezí 12-24V. Z hlediska co nejnižšího proudového namáhání je výhodné využití napětí 24V. Vyšší napěťová hladina také

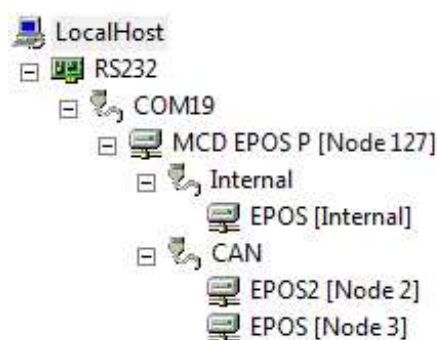
umožňuje dosažení vyšších maximálních otáček motorů. Při testování se však ukázalo, že proudové nároky ve špičkách převyšují možnosti používaného zdroje, což způsobovalo restart jednotek a chybová hlášení. Proto byl využit 12V startovací olověný akumulátor, který byl stále dobíjen. Podle Hammerbauera vykazuje olověný článek o jmenovitém napětí 2V při plném nabití, kdy je již veškerá dodávaná energie spotřebovávána pouze k rozkladu vody (tzv. plynování), napětí až 2,8V [13. HAMMERBAUER, str. 42]. U šestičlánekové baterie je tedy napětí při nabíjení až 16,8V. Z tohoto důvodu byla jako napájecí napětí pro sestavu pohonů zvolena hodnota 16V, při které akumulátor nijak výrazně neplynuje a dostatečně pokrývá proudové nároky zařízení.

## 4 Vývoj řídicího programu

### 4.1 Uživatelský software EPOS Studio

Konfigurace řídicích jednotek EPOS, EPOS P a inteligentních pohonů MCD se provádí pomocí softwaru EPOS Studio, který je volně stažitelný z webových stránek společnosti Maxon Motor v sekci Service & Download zadáním klíčového slova EPOS P.

Po připojení řídicí jednotky k PC a spuštění programu lze pomocí průvodce vybrat použité komponenty a způsoby komunikace a vytvořit tak základní strukturu systému. V případě našeho zařízení je programovatelná řídicí jednotka inteligentního pohonu MCD nadřazena a zbylé dvě jednotky EPOS připojeny pomocí CAN sběrnice.



Obr.22: Struktura připojených řídicích jednotek.

Jak je patrné z obrázku výše, jednotky jsou jednoznačně identifikovány pomocí tzv. Node. Na CAN sběrnici může být připojeno až 127 zařízení, přičemž Node lze na jednotkách mechanicky měnit pomocí MINI-DIP přepínačů. U MCD je tento přepínač umístěn uvnitř pouzdra a z toho důvodu bylo raději ponecháno původní označení 127.

Pro další postup je nutné přiřadit jednotkám připojené motory, resp. vložit jejich parametry. To se provádí pomocí průvodce Startup Wizzard. Všechny parametry lze snadno získat v katalogu nebo případně na webových stránkách společnosti Maxon motor. Ve stejném menu jako StartupWizzard se nachází také položka Regulation Tuning, která umožňuje nastavení zesílení regulátorů. Tento proces je nezbytně nutný pro dosažení požadovaných vlastností proudových, rychlostních a polohových

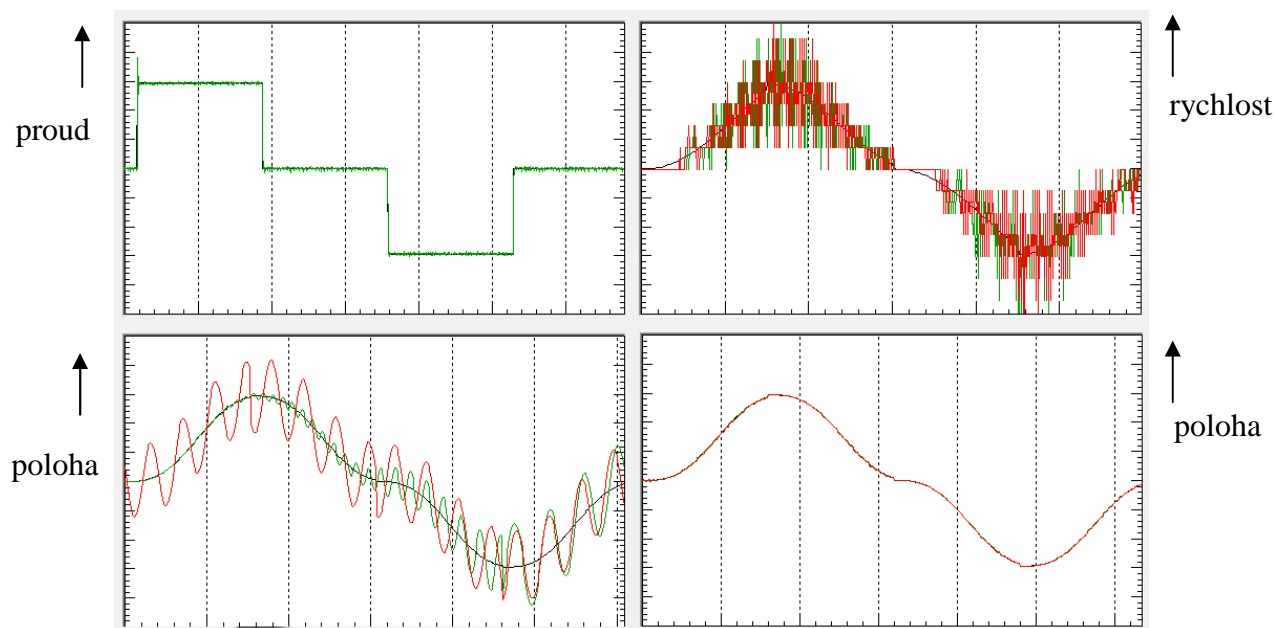
charakteristik. Program umožňuje provést nastavení automaticky i manuálně. Automatické nastavení je velmi dobrou pomůckou, ale nezaručuje optimální nastavení ve všech případech. Nicméně je výhodné tento způsob aplikovat a jeho výsledek použít jako výchozí pro manuální nastavení.

Pro správné a přesné natáčení disků má nejvyšší prioritu nastavení regulátoru polohy. Nastavení zesílení regulátoru motoru A-max bylo poněkud zkomplikováno skutečností, že byl použit hliníkový disk místo polykarbonátového, který byl původně pro tento pohon plánován. Důvodem bylo neúspěšné vytváření zářezů do polykarbonátu s dostatečnou přesností a estetickou dokonalostí. Pro větší hmotnost, a tedy i moment setrvačnosti, nemá tento 6W motor dostatečnou rezervu výkonu, a proto i regulace dynamických pohybů je obtížná. Z tohoto důvodu není možno tímto motorem demonstrovat stejně rychlé změny pohybů jako u motorů zbývajících. Následující tabulka obsahuje hodnoty složek PID pro jednotlivé jednotky.

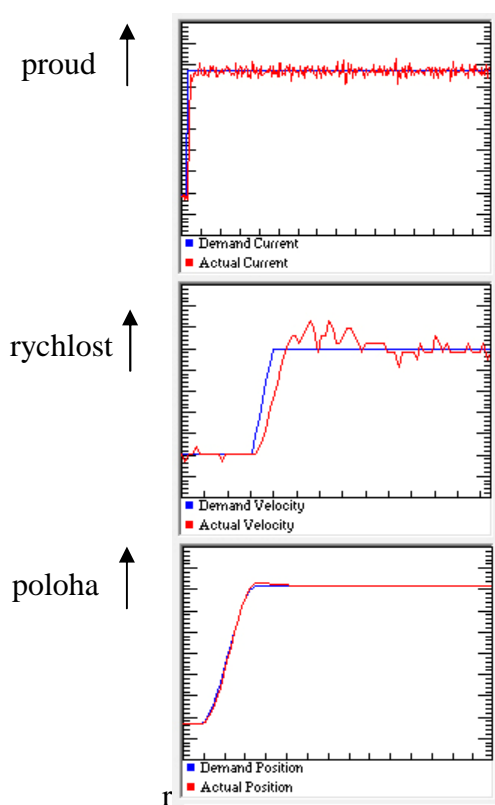
Typ motoru	Typ regulátoru	P	I	D
<b>A-max</b>	Proudový	1125	987	-
	Rychlostní	400	15	-
	Polohový	1500	15	10
<b>EC-max</b>	Proudový	1017	300	-
	Rychlostní	5348	315	-
	Polohový	383	390	2006
<b>MCD</b>	Proudový	982	1106	-
	Rychlostní	3184	732	-
	Polohový	1000	10	500

*Tab.2: Hodnoty zesílení regulátorů.*

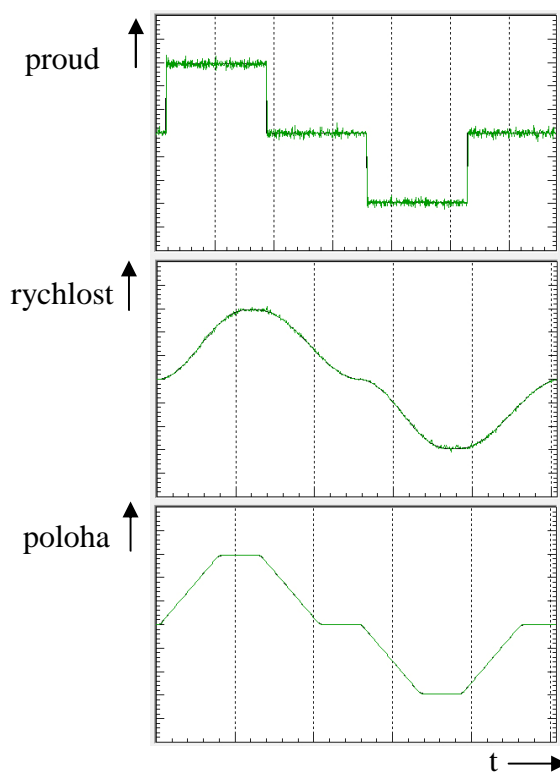
Pro proudový a rychlostní regulátor není složka D k dispozici. Následující grafy ukazují výsledky jednotlivých ladících procesů všech použitých pohonů. Software bohužel neumožňuje odečtení konkrétních hodnot, avšak pro ukázkou kvality průběhu postačuje.



Obr.22a: Průběhy naladěných regulátorů EPOS24/1.



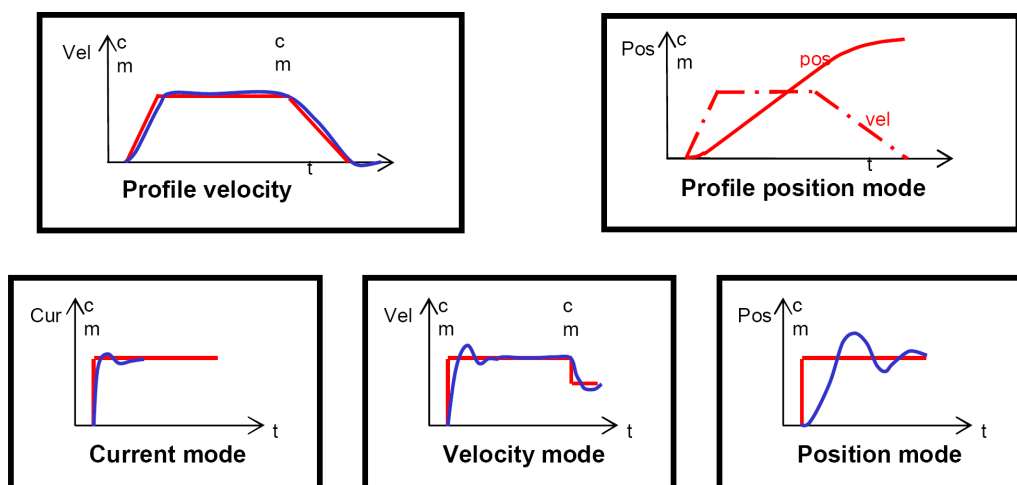
Obr.22b: Průběhy naladěných regulátorů EPOS2.



Obr.22c: Průběhy naladěných regulátorů MCD.

Z grafů jsou patrný rozdíly v úspěšnosti jednotlivých nastavení. U průběhů jednotky EPOS 24/1 lze pozorovat velmi nespojitý průběh regulátoru rychlosti. Průběhy regulátoru polohy jsou uvedeny dva. Vlevo je průběh při použití rychlosti 500 ot/min a je zde vidět kmitavost soustavy. Pravý graf pak zobrazuje průběh při použití rychlosti 100 ot/min. Zde jsou již výsledky uspokojivé. Naladění parametrů jednotky EPOS2 i MCD je výrazně na vyšší úrovni. Ladící aplikace pro jednotku EPOS2 je odlišná od zbývajících, pro také kvalita získaných průběhů není valná a průběh regulátoru rychlosti není zcela korektní.

Jak již bylo naznačeno, základními akcemi, které jednotka vykonává, jsou regulace proudu, rychlosti a polohy. Pro dílčí pohyby je možno využít různých operačních módů, které pomocí jednoduchého menu umožňují nastavit parametry pohybu a stiskem tlačítka je vykonat. Tato funkce je základním stavebním kamenem pro tvorbu programu. V proudovém módu se uplatňuje pouze proudový regulátor, přičemž linearita závislosti momentu na proudu je u motorů Maxon velmi přesná. Díky tomu lze proudovým regulátorem velmi efektivně regulovat mechanický moment na hřídeli. K regulaci rychlosti a polohy lze využít základního nastavení, či tzv. profilu. V případě první možnosti uživatel zadá pouze požadovanou hodnotu, případně hodnoty zesílení regulátorů. V druhém případě je možnost zadání detailnějších parametrů jako např. průběh zrychlení, nebo v polohovém módu rychlost natočení do požadované polohy včetně průběhů rychlosti a hodnot akcelerace a decelerace. Pro lepší představu znázorňuje příklady operačních módů následující obrázek 23.



Obr.23: Příklady operačních módů EPOS studia.[14]



Důležitým módem je tzv. Homing mode, který mimo jiné umožňuje nastavení hřídele do výchozí (indexové) polohy. Ta je dána funkcí enkodéru, který má mimo standardních dílků také jeden jedinečný, který právě nalezení počáteční polohy umožňuje. V případě této diplomové práce jde o důležitou funkci, která výrazně ulehčuje programování.

Nástroje programu EPOS Studio dále umožňují mnoho dalších možností nastavení. Kompletní výčet získá čtenář v příručce EPOS P - Firmware specification (viz. Seznam literatury).

#### **4.1.1 Uživatelské prostředí OPENPCS**

Jak již bylo řečeno, lze s jednotkami EPOS komunikovat přes grafické rozhraní, ve kterém lze pomocí operačních módů ručně zadat hodnotu požadované veličiny. Pro složitější aplikace je však většinou zapotřebí vytvořit specifickou souslednost příkazů, jinými slovy vytvořit program, jehož povely budou jednotky následně vykonávat. V případě jednotek EPOS P lze takový program nahrát přímo do paměti jednotky a zařízení pak může pracovat i bez připojeného řídicího počítače. Pro vlastní programování poskytuje společnost Maxon knihovny Windows DLL (Dynamic link library), které jsou dostupné pro Microsoft Visual C++, Microsoft Visual Basic, Borland C++ Builder, Borland Delphi a National Instruments LabView. Díky tomu lze program vytvořit v prakticky libovolném programovacím jazyce, podle potřeb uživatele.

Druhou možností je využití vývojového prostředí OPENPCS, které je součástí programu EPOS Studio. Tento nástroj umožňuje programovat pomocí několika následujících jazyků. Jsou to: IL (Instruction list), ST (Structured text), LD (Ladder diagram), CFC (Continuous function chart editor) a FBD (Function block diagram editor). Každý z jazyků má své klady a zápory a záleží na programátorovi, který mu bude lépe vyhovovat. [16. HNÍZDIL, 2007, str. 4-6]

Autor této práce využil možností jazyka ST, tedy strukturovaný text, a to z důvodu zkušeností s podobnými programovacími jazyky. Z hlediska programovacího jazyka programování bylo nejvíce logických vazeb provedeno pomocí příkazu „case of“. Ten se používá tam, kde je potřeba rozlišit více hodnot jedné proměnné a kde by bylo použití vnořených příkazů *if* nevýhodné. „Case of“ má tedy výhodu ve velmi přehledné syntaxi, zvláště u proměnných s mnoha možnými hodnotami. Zbývá

logická vyhodnocení byla provedena právě s pomocí zmíněného příkazu „if - else“, který je základním kamenem všech logických algoritmů.

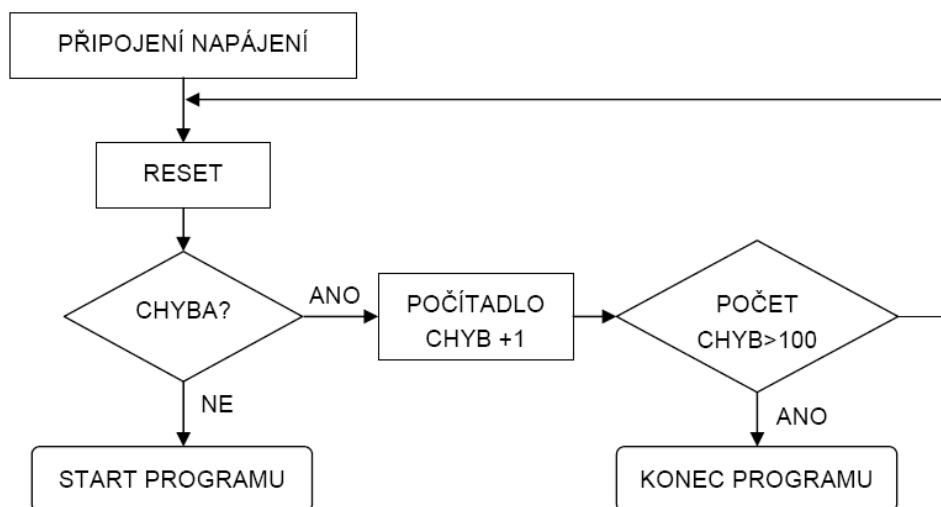
## **4.2 Struktura programu**

Prvotní úvaha o způsobu vytvoření programu zahrnovala několik bodů. Cílem programu měla být ukázka možností pohonů, tedy posloupnost dynamických pohybů, při kterých je vždy pohyb hřídele jednoho motoru závislý na poloze motoru sousedního. Vzhledem k přesnosti použitých enkodérů a preciznosti motorů, které jsou schopny polohování s velmi malou tolerancí, nebyl problém uvažovat o prostém naprogramování libovolných pootočení o násobky úhlu o velikosti  $90^\circ$ . Tento postup by však byl možný pouze s dokonale přesným manuálním nastavením výchozích poloh. Seběmenší odchylka by totiž dříve nebo později vedla ke kontaktu dvou disků, což není přípustné.

### **4.2.1 Vývojový diagram**

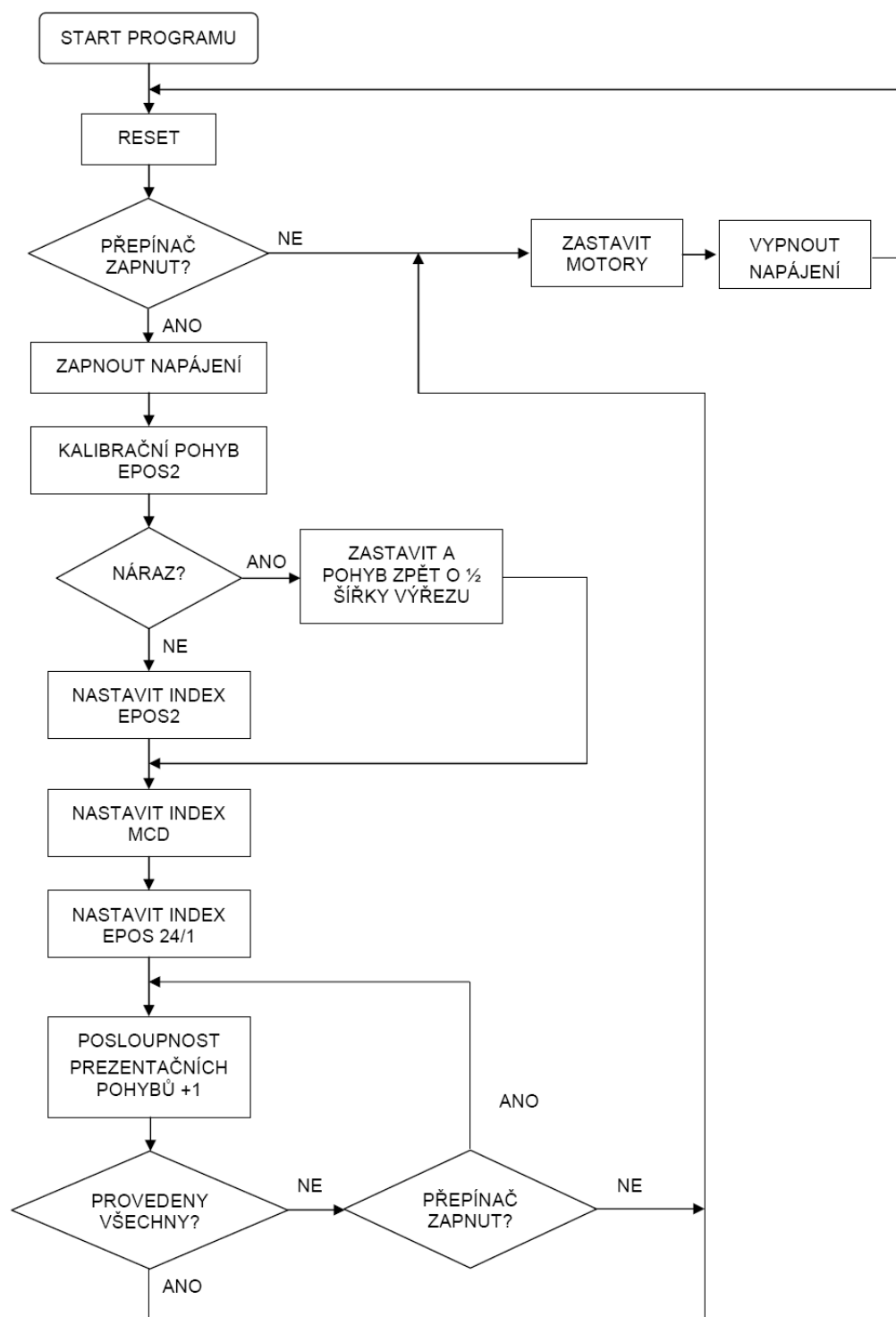
Bylo tedy jasné, že je potřeba vytvořit algoritmus, který sám dokáže nalézt výchozí polohy. Obtížnost této úlohy spočívá v možných vzájemných polohách disků při spuštění programu. Řešením bylo použití módu, při kterém je měřena a vyhodnocována aktuální hodnota proudu do motoru, tedy i velikost mechanického momentu. V principu program postupuje tak, že uvede do pohybu první disk, přičemž mohou nastat dvě situace. Buď se tento disk právě nachází ve výřezu disku sousedního a může se tedy volně otáčet, nebo je sousedním kotoučem blokován – tyto situace jsou vyhodnoceny a algoritmus pokračuje odpovídajícím zásahem. Výsledkem je výchozí nastavení všech pohonů, tedy stav, kdy je možno zahájit vlastní prezentační program.

Vlastní programovací práce bylo vhodné zahájit přípravou vývojového diagramu, což je ve své podstatě grafické znázornění algoritmu.



Obr.24: Zjednodušený vývojový diagram 1.

Výše uvedený diagram zjednodušeně popisuje kroky programu po připojení napájení. Nejprve je proveden restart jednotek a je zahájena kontrola chyb. Pokud chyby nejsou detekovány, je umožněno zahájení programu. V případě vyskytnuvších se chyb dojde k opětovnému resetu. Pokud se ani po stech cyklech programu nezdaří reset provést úspěšně, dojde k jeho ukončení. K tomuto řešení bylo přistoupeno z důvodu různých hazardních stavů po připojení napájecího napětí. Na další stránce je uveden vývojový diagram vlastního programu.



Obr.25: Zjednodušený vývojový diagram 2.

Po zahájení programu je po opětovném resetu provedena kontrola stavu zapínacího přepínače. Pokud je zapnut, pokračuje algoritmus dalším krokem. Pokud

tomu tak není, dojde k zastavení motorů a vypnutí jejich napájení. Zde se to zdá být nelogické, ale je třeba si uvědomit, že program pracuje v cyklech. Jestliže se po zapnutí napájení motory samozřejmě netočí, tak pokud dojde k vypnutí přepínače během pohybu, musí zařízení zareagovat. Pokud by se program ukončoval pouhým odpojením napájecího napětí, mohlo by dojít k nechtěnému střetu disků.

Dalším krokem v případě zapnutého přepínače je povolení napájení motorů a spuštění autokalibračního procesu. Ten začíná pomalým pohybem prostředního disku, řízeného jednotkou EPOS2. Pokud dojde ke střetu s minimálně jedním sousedním diskem, je tato událost vyhodnocena proudovým regulátorem a pohyb zastaven. Parametry tohoto pohybu lze nastavit tak přesně, že vlastní náraz je velice jemný a nezpůsobuje žádné mechanické opotřebení povrchů. Algoritmus nyní „ví“, že je disk blokován a provede natočení v opačném smyslu o předem nastavenou vzdálenost (počet qc), která odpovídá polovině šířky výřezu sousedních disků. Tímto je prostřední kotouč nastaven tak, že oba krajní disky se mohou volně otáčet. Pokud při kalibračním pohybu prostředního disku nedojde k nárazu, tato událost se po nastavené dráze vyhodnotí a motor se může natočit do indexové polohy.

Zde je potřeba upřesnit, že indexová poloha je pouze jedinečnou polohu natočení hřídele a nikoliv disku. Je sice možno motor při stavbě natočit do výchozí polohy a poté disk přesně připevnit, ale vzhledem k poměrně složitému hledání vyvážené polohy při dotahování matice unášeče je tato metoda prakticky nerealizovatelná. Tento problém je tedy ošetřen tak, že po nastavení výchozí polohy motoru s libovolně natočeným diskem se přičte počet qc potřebných k dosažení žádané polohy disku. Tato hodnota se získá měřením při manuálním ovládání v tzv. Homing módu.

Pokud je prostřední disk tedy natočen tak, že oba krajní pohony se mohou volně otáčet, algoritmus provede natočení do indexových poloh i u těchto motorů.

Autokalibrace je nyní dokončena a může se přistoupit k vykonávání prezentační posloupnosti pohybů. Ve vývojovém diagramu je pro jednoduchost tato činnost znázorněna pouze jedním blokem. Ve skutečnosti jde však o seznam dílčích pohybů typu: natočení MCD o 90° rychlostí 1000ot/min, natočení A-max o 360° rychlostí 50 ot/min, atd. Každý tento krok má své číslo a po jeho vykonání program přechází na krok další. Při každém průběhu programu dochází k vyhodnocování stavu přepínače. Ve chvíli, kdy jsou vykonány všechny kroky ukázky, dochází k zastavení motorů, odpojení jejich napájení a program se vrací zpět na začátek, aby mohlo dojít k nové kalibraci.

Tento postup je zaveden pro případ, že by došlo vlivem tolerancí k situaci, kdy by kotouče nebyly zastavovány přesně uprostřed sousedních výřezů. Přesnost polohování je sice u těchto pohonů velmi vysoká, ale vzhledem k tomu, že zařízení je určeno pro celodenní nepřetržitý provoz (např. na výstavě), je tento postup opodstatněný.

#### 4.3 Testování a ladění programu

Při sestavování a testování programu bylo postupováno po částech a ze zřejmých důvodů byly disky nahrazeny čtyřlístými modelářskými vrtulemi. Díky tomu byla k dispozici velká tolerance polohování, tedy prostor pro chyby programátora. Nejvíce problémů způsobovalo ladění autokalibrace. Zde docházelo k častým nedostatkům, vzniklým buď nesprávnou algoritmizací nebo vzhledem ke složitosti této části i díky syntaktickým chybám. Vývojové prostředí OPENPCS a konkrétně jazyk ST bohužel obsahuje velmi slabý nástroj pro odhalení takových chyb. Při kompilovacím procesu sice překladač zjistí syntaktické nedostatky, ale jejich lokalizace není vždy dostatečná. Hledání zapomenutého středníku se tak mění přímo v detektivní záležitost. Z tohoto důvodu je výhodnější používat programovací jazyky vyšších úrovní (např. Borland C++), což je díky volně dostupným knihovnám možné.

Předpokládaným problémem bylo také chování nejmenšího motoru A-max, zatíženého hliníkovým diskem. Jak již bylo zmíněno, u tohoto pohonu bylo těžké nalézt vhodné hodnoty zesílení jednotlivých regulátorů a díky tomu se nedařilo motoru zastavovat v žádaných polohách bez zákmitu. Bylo tedy nutné pohyby přizpůsobit jeho možnostem. Velmi rychlého sledu natočení o 90°, kdy již téměř zrak nerozeznává směr pohybu a téměř ani pohyb samotný, se motor A-max nemůže účastnit. U zbylých motorů při velmi rychlých změnách pohybu k zákmitům docházelo taktéž, ale zvolením vhodných hodnot zrychlení a zpomalení bylo možno tento jev velmi výrazně potlačit.

Při testování také vznikl neočekávaný problém, projevující se nechtěným ukončováním programu. Tento děj nastává v náhodných intervalech od jednotek minut až po několik hodin provozu. V současné době probíhá analýza tohoto nedostatku. Pravděpodobnou příčinou bude externí rušení, které může způsobovat hazardní stavy jednotek. Řešení tedy bude pokračovat cestou kontroly stínění kabeláže a implementací algoritmů, které by chybové stavy řešily. Z časových důvodů však výsledky řešení nemohou být uvedeny v této práci.

## 5 Možnosti rozšíření zařízení

Hotový aparát v době vydání této diplomové práce již může plnit potřeby provozovatele. V souvislosti s možnostmi použitých pohonů lze však uvažovat o dalších rozšířeních. Prvním velmi užitečným doplněním je instalace napájecího zdroje.

### 5.1 Instalace napájecího zdroje

Toto rozšíření je usnadněno tím, že v současnosti je ve spodním rámu ukryta pouze veškerá kabeláž a při jeho návrhu bylo s prostorem pro zdroj počítáno. Nároky na vlastnosti vhodného napájecího zdroje jsou však nemalé. Zdroj by měl být schopen dodávat konstantní napětí o hodnotě 16V. V případě použití výhodnější hodnoty napětí, tedy 24V, by muselo být znovu nastaveno zesílení jednotlivých regulátorů všech jednotek. Právě úroveň napájecího napětí má zásadní vliv na otáčky motorů a jejich charakteristiky. I přes to však výhoda tohoto provedení převyšuje nároky na úpravy. Druhým kritériem je dostatečná proudová tvrdost. Zvláště 120W EC motor při svém rozběhu či brzdění vytváří výrazné proudové špičky. Většina zdrojů v takovém případě reaguje snížením napětí, což v případě poklesu pod 12V způsobí restart řídicí jednotky a vygenerování chybové hlášky. Zdroj by tedy měl být schopen dodávat alespoň 5A v případě zvolení méně dynamického algoritmu. Levným řešením by mohlo být použití počítačového spínaného zdroje, který poskytuje dostatečný výkon. Bohužel tyto poskytují pouze napětí o hodnotách 5 a 12V. Toto nízké napětí by se negativně promítlo na regulačních charakteristikách a možnostech motorů při dynamických změnách polohy. Řešením by bylo použití měniče, který by napětí zvyšoval na žádaných 24V. Tento způsob by však byl opět na úkor maximálního odeberatelného proudu. Velmi výhodné řešení je v použití vhodného kapacitoru, který by proudové nároky ve špičkách pokrýval. Takový kapacitor by však byl velmi rozměrný a drahý. Levnější variantou je zapojení zálohovacího chemického akumulátoru. Pro tuto aplikaci jsou vhodné například olověné akumulátory. Jsou bezúdržbové, mají poměrně vysokou kapacitu, avšak svojí konstrukcí neumožňují dlouhodobé přebíjení. Tlak vznikajících plynů by výrazně zkrátil životnost a dokonce by mohl způsobit explozi akumulátoru. Nízké napětí, asi 13,8V, které lze prohlásit za udržovací, by mělo stejný negativní dopad, stejně jako

možné řešení s měničem, jako při použití PC zdroje. Použití akumulátoru má ale jednu nespornou výhodu v možnosti zálohování energie. Současný stav totiž není ošetřen proti výpadku napájecího napětí. Při této události nejsou motory blokovány, což v případě pohybu před výpadkem může opět způsobit toliko nežádoucí kontakt dvou disků.

## **5.2 Možnosti poháněných elementů**

Koncepce tří motorů vedle sebe umožňuje vytvoření podobných úloh na stejném principu. Například ono použití modelářských vrtulí, které bylo zvoleno při odladování řídicího programu, bylo velmi efektní ve fázi, kdy se všechny motory točily stejnou rychlostí, což velké toleranční pole umožňuje. Zrakový vjem tohoto pohybu totiž vzbuzuje dojem, že jde o průhledné vzájemně se protínající kruhové plochy. Dalším návrhem je použití nekruhových elementů, tvořících při různém natočení různé obrazce.

## **5.3 Designové doplňky**

V neposlední řadě je zde otázka vizuálního provedení, které je opodstatněné v případě používání aparátu při firemních prezentacích. Jednou z možností je aplikace potisku jednotlivých disků. Jelikož mají rozměry standardního CD, nabízí se využití běžně prodávaných samolepících štítků, určených právě pro kompaktní disky.

Zařízení jako takové je určeno pro umístění do uzavřeného zaskleného prostoru, např. vitríně, a to hlavně z bezpečnostních důvodů. Rychle rotující disky dokážou bez problému rozříznout i silnou čtvrtku, proto není vyloučeno přivození úrazu. Právě z tohoto důvodu původní návrh počítal s integrací základní desky do rámu, který by zakrýval i horní část aparátu. Použití hliníkových profilů pro stavbu stávajícího rámu však umožňuje v tomto smyslu velice jednoduché rozšíření.

K pozvednutí vizuální stránky se dále nabízí cesta doplňkového osvětlení. Dobře provedené nasvícení scény vždy umocňuje vzhled prezentovaného objektu. Navíc by v tomto případě mohlo být využito závislosti toku světla na aktuální poloze kotoučů. Pro přiblížení myšlenky autor uvádí možnost realizace barevného nasvícení jednotlivých kotoučů a střídání jejich barevného podání po každém uskutečněném pohybu.



Možností rozšíření či nenáročných změn je velmi mnoho, což je nespornou výhodou použité koncepce. Zařízení lze tak snadno přizpůsobovat aktuálním potřebám provozovatele.

## Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout, sestavit a oživit prezentační panel využívající elektrických pohonů firmy Maxon. V první řadě autor provedl teoretický rozbor úlohy a použitých prvků. Po návrhu panelu byla vyhotovena technická dokumentace mechanické části pro potřeby výroby, jakož i virtuální prostorový model, usnadňující celkový náhled autora i výrobních subjektů. Pro realizaci byly na základě vypočtených parametrů zvoleny pohony MAXON A-max, EC-max, řízené jednotkami EPOS, a inteligentní pohon MCD. Pro komunikaci s PC byla použita sběrnice RS232 s redukcí na USB. Použití integrovaného USB rozhraní řídicí jednotky EPOS2 nebylo doporučeno vzhledem ke stupni odladění ze strany výrobce.

Pro vytvoření řídicího programu bylo využito speciálního software taktéž z dílny MAXON motor. Po zapojení elektromotorů a podpůrných obvodů byly určeny parametry zesílení regulátorů a testováním zjištěny skutečné možnosti pohonů. Na základě těchto údajů byla vytvořena posloupnost pomalých i dynamických pohybů, ukazujících reálné možnosti pohonů, což je žádoucí pro potřeby jejich prezentace. U jednotky EPOS24/1 se z důvodu použití hliníkového, tedy těžšího disku než bylo plánováno, nezdařilo zcela dostatečně odladit zesílení regulátorů. Tento nedostatek se projevil omezenými možnostmi pohybů bez nevhodného zakmitávání. Dále bylo nutné provést testování provozu s cílem doladit funkce tak, aby nebylo zapotřebí zásahů obsluhy. Tento bod se však setkal s neočekávaným problémem náhodného ukončování programu a nebyl v době odevzdání práce plnohodnotně vyřešen.

Systém byl umístěn do rámu z hliníkových profilů, které zajišťují dostatečnou pevnost a stabilitu. Panel splňuje všechny předpoklady funkčního, estetického, ale i propagačního směru.

Dále byl proveden rozbor možností rozšíření. Rozměry rotujících disků byly záměrně voleny tak, aby odpovídaly rozměrům standardního kompaktního disku. To umožňuje obsluhu jednoduché vybavení disků potiskem, odpovídajícím tématu konkrétní události. Vzhledem k univerzálnosti koncepce je možno pohony místo rotujících disků vybavit např. vrtulemi, takže vizuální efekt by byl dotvořen proudícím vzduchem a pozorovatel by tak byl více vtažen do prezentačního děje. Zajímavé se jeví

řešení tohoto či podobných zařízení s použitím systému s tzv. elektronickou vačkou, která umožňuje vázaný pohyb více pohonů, avšak s nelineárním průběhem.

## **Seznam použitých zkratk**

CAN - Controller Area Network

CD – compact disc

CFC - Continuous function chart editor

DC – direkt current

EC – electronic commutation

EPOS - easy (to use) positioning systém

FBD - Function block diagram editor

LD - Ladder diagram

IL - Instruction list

LED – light-emitting diode

MCD – maxon compact drive

PWM - pulse width modulation

ST - Structured text

USB – universal seriál bus

3D – three-dimensional, trojrozměrný

## Seznam použité literatury

- [1] CHMELÍK, Karel, Elektrické stroje v energetice, Ostrava: VŠB, 2003, ISBN 80-248-0314-3
- [2] Elektronický dokument CVEL, Automotive electronics – DC motors, dostupné z <http://www.cvel.clemson.edu/auto/actuators/motors-dc.html>
- [3] BROŽ, Václav, Přínos nových motorů maxon, článek odborného periodika ELEKTRO, č. 06/2006, Praha: FCC public, 2006
- [4] Elektronická dokumentace Uzimex Praha, Řízení polohy malých motorů, Praha, 2004, dostupné z [www.uzimex.cz](http://www.uzimex.cz)
- [5] Webová prezentace Komutex, Výrobní profil, 2008, dostupné z <http://www.komutex.cz/page.php?komuttory&p=7>
- [6] Elektronická dokumentace Uzimex Praha, Malé stejnosměrné motory Maxon, Praha, 2002, dostupné z [www.uzimex.cz](http://www.uzimex.cz)
- [7] Elektronická dokumentace Uzimex Praha, Maxon EC řízení, Praha, 2003, dostupné z [www.uzimex.cz](http://www.uzimex.cz)
- [8] Maxon motor: Catalogue program 08/09, Sachseln, Maxon motor ag, 2008
- [9] Elektronický dokument hw.cz, Co je CANOpen a jak na něj, 2006, dostupné z <http://hw.cz/Produkty/Obecne-produkty/ART1563-Co-je-CANOpen-a-jak-na-nej.html>
- [10] KŘIVÝ, Ivan – KINDLER, Evžen, Simulace a modelování, Ostrava: OU, 2001
- [11] GOOGLE, Domovská stránka aplikace SketchUp [online], 2009 [cit. 13. května 2010], dostupné z <http://sketchup.google.com>

- [12] JAKUBEC, Augustin, Dílenská cvičení II, Praha: SNTL, 1990, ISBN 04-530-90
- [13] HAMMERBAUER, Jiří. 6. Olověné akumulátory [online], [cit. 13. května 2010], dostupné z <http://www.jergym.hiedu.cz/~canovm/elektro/clanky2/olov.pdf>
- [14] BROŽ, Václav, Programovatelný regulátor rychlosti a polohy pro sběrnici CAN, článek odborného periodika AUTOMA, č. 01/2006, Praha: FCC public, 2006
- [15] Maxon motor control, Epos P, programmable Position Controller – Firmware Specification, Sachseln, Maxon motor ag, 2007, Doc.Nr. 810011-01
- [16] HNÍZDIL, Jiří, Uživatelský software, Praha, 2007, dostupné z [www.uzimex.cz](http://www.uzimex.cz)
- [17] SOUČEK, Pavel. Servomechanismy ve výrobních strojích. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, ISBN 80-01-02902-6
- [18] JAVŮREK, Jirí. Regulace moderních elektrických pohonů. Praha: Grada publishing a.s., 2003. ISBN 80-247-0507-9
- [19] Maxon motor control: Epos P, Application note – CANOpen Basic information, Sachseln, Maxon motor ag, 2007, Doc.Nr. 786912-04
- [20] Maxon motor control: Epos P, programmable Position Controller – Firmware Specification, Sachseln, Maxon motor ag, 2007, Doc.Nr. 810011-01
- [21] EČER, Boleslav, Příručka pro vojenské spojaře, Praha: Naše vojsko, 1968, ISBN 28-105-68
- [21] DRASTÍK, František, Strojnické tabulky pro konstrukci i dílnu, Ostrava: Montanex, 1999, ISBN 80-85780-95-X
- [22] UZIMEX, Oblíbené aplikace pohonů maxon, Periodikum Technika a trh 5/2007

## Seznam obrázků

Obr.1: Zjednodušený řez stejnosměrným motorem.	11
Obr.2: Samonosné vinutí Maxon.	12
Obr.3: Ukázka klasických komutátorů a grafitových kartáčů.	13
Obr.4: Řez elektronicky komutovaným stejnosměrným elektromotorem.	14
Obr.5: Znázornění průběhu PWM.	15
Obr.6: Obdélníkový a sinusový průběh proudu do vinutí.	16
Obr.7: Schéma magnetického a optoelektronického inkrementálního snímače.	17
Obr.8: Výkonová křivka motoru A-Max 22.	18
Obr.9: Motor A-Max s rozloženým inkrementálním snímačem.	18
Obr.10: Výkonová křivka motoru EC – Max 40.	19
Obr.11: Řídící jednotka EPOS 24/1.	20
Obr.12: Řídící jednotka EPOS2 50/5.	20
Obr.13: Řez pohonem MCD.	21
Obr.14: Prvotní model navrhovaného zařízení.	23
Obr.15: Náhled softwaru MSP.	26
Obr.16: Unášec pro upnutí disku na hřídel.	26
Obr.17: Virtuální model zařízení.	28
Obr.18: Aparát ve stádiu rozpracování.	31
Obr.19: Konektor pro spojování hliníkových profilů.	33
Obr.20: Použití vymezovací lišty.	33
Obr.21: Schéma zapojení.	34
Obr.22: Struktura připojených řídicích jednotek.	36
Obr.22a: Průběhy naladěných regulátorů EPOS24/1.	38
Obr.22b: Průběhy naladěných regulátorů EPOS2	38
Obr.22c: Průběhy naladěných regulátorů MCD.	38
Obr.23: Příklady operačních módů EPOS studia.	39
Obr.24: Zjednodušený vývojový diagram 1.	42

## **Seznam tabulek**

Tab.1: Hodnoty a výpočet momentů setrvačnosti disků.

25

Tab.2: Hodnoty zesílení regulátorů.

37

## **Obsah přiloženého CD**

Text diplomové práce.

Podklady pro výrobu – technická dokumentace.

Programové soubory.



## Příloha 1

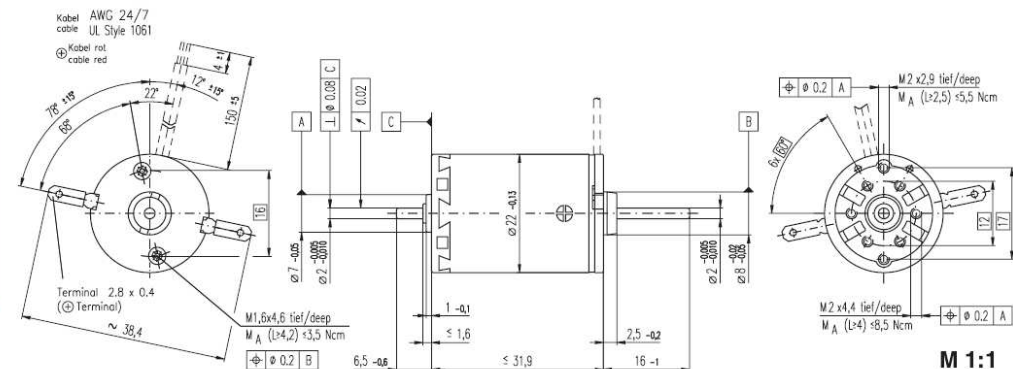
### Seznam použitých komponent

Typ	Objednací číslo Maxon
Maxon A-max 22 s enkodérem	300679
Maxon EC – max 40	283871
Maxon MCD EPOS P 60W	315665
EPOS 24/1	280937
EPOS2 50/5	347717
2x CAN COM cable	256636
MCD signal cable	256325
MCD CAN COM cable	263214
EPOS power cable	275829
RS232 -> USB cable	
Rezistor 120Ohm	
Přepínač kolébkový	
Sada nerezových držáků motorů	
Hliníková základní deska	
Sada kotoučů 120mm	
Rám z hliníkových profilů	

## Příloha 2

# Katalogový list motoru A-max.

**A-max 22** Ø22 mm, Graphite Brushes, 6 Watt



 Stock program  
 Standard program  
 Special program (on request)

**Order Number**

with terminals	110156	110158	110159	110160	110161	110162	110163	110164	110165	110166	110167	110168
with cables	139848	353023	353024	231171	353025	353026	231174	353027	353028	353029	316659	353603

### Motor Data

**Motor Data**  
Values at nominal voltage

Electrical characteristics at nominal voltage														
1	Nominal voltage	V	6.50	9.0	9.0	12.0	12.0	15.0	18.0	24.0	24.0	36.0	48.0	48.0
2	No load speed	rpm	9250	9710	8530	10200	9200	10100	9800	10500	8500	9650	9130	8220
3	No load current	mA	83.2	57.9	49.7	45.9	40.5	36.0	29.0	23.7	18.4	14.2	10.0	8.85
4	Nominal speed	rpm	5550	6370	5240	6990	5960	6880	6630	7430	5340	6500	5920	5020
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	5.82	6.52	6.76	6.77	6.82	6.87	6.94	6.97	7.07	7.00	6.91	7.02
6	Nominal current (max. continuous current)	A	1.06	0.816	0.741	0.664	0.602	0.529	0.433	0.350	0.287	0.214	0.150	0.138
7	Stall torque	mNm	16.1	20.4	18.7	22.8	20.4	22.7	22.3	24.3	19.5	21.9	20.1	18.5
8	Starting current	A	2.73	2.38	1.92	2.09	1.69	1.64	1.30	1.14	0.745	0.631	0.411	0.340
9	Max. efficiency	%	65	70	69	72	71	72	73	71	72	71	70	
Characteristics														
10	Terminal resistance	Ω	2.20	3.78	4.69	5.74	7.12	9.15	13.8	21.0	32.2	57.1	117	141
11	Terminal inductance	mH	0.106	0.222	0.288	0.362	0.445	0.584	0.890	1.37	2.10	3.68	7.29	8.95
12	Torque constant	mNm / A	5.90	8.55	9.73	10.9	12.1	13.9	17.1	21.2	26.2	34.8	48.9	54.3
13	Speed constant	rpm / V	1620	1120	981	875	790	689	558	450	364	274	195	176
14	Speed / torque gradient	rpm / mNm	604	494	473	461	465	455	445	445	447	450	466	458
15	Mechanical time constant	ms	25.2	21.8	21.2	20.6	20.3	19.9	19.4	19.1	19.0	18.9	18.9	18.8
16	Rotor inertia	cm <sup>2</sup>	3.98	4.22	4.28	4.26	4.17	4.17	4.11	4.11	4.07	4.00	3.88	3.92

### Specifications

### Thermal data

17	Thermal resistance housing-ambient	20 K / W
18	Thermal resistance winding-housing	6.0 K / W
19	Thermal time constant winding	10.1 s
20	Thermal time constant motor	540 s
21	Ambient temperature	-30 ... +85°C
22	Max. permissible winding temperature	+125°C

### Mechanical data (sleeve bearings)

23	Max. permissible speed	9800 rpm
24	Axial play	0.05 - 0.15 mm
25	Radial play	0.012 mm
26	Max. axial load (dynamic)	1 N
27	Max. force for press fits (static) (static, shaft supported)	80 N 440 N
28	Max. radial loading, 5 mm from flange	2.8 N

### Mechanical data (ball bearings)

23	Max. permissible speed	9800 rpm
24	Axial play	0.05 - 0.15 mm
25	Radial play	0.025 mm
26	Max. axial load (dynamic)	3.3 N
27	Max. force for press fits (static) (static, shaft supported)	45 N 440 N
28	Max. radial loading, 5 mm from flange	12.3 N

### Other specifications

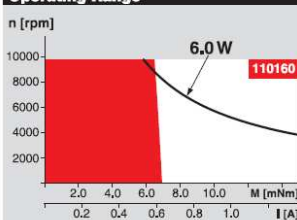
29	Number of pole pairs	1
30	Number of commutator segments	9
31	Weight of motor	54 g

Values listed in the table are nominal.  
Explanation of the figures on page 49.

**Option**

**Option**  
Ball bearings in place of sleeve bearings

### Operating Range



## Comments

**Continuous operation**  
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.  
= Thermal limit.

**Short term operation**  
The motor may be briefly overloaded (recurring).

— Assigned power rating

## maxon Modular System

Overview on page 16 - 21

**Planetary Gearhead**  
 Ø222 mm  
 0.1 - 0.6 Nm  
 Page 228 / 229

**Planetary Gearhead**  
 Ø222 mm  
 0.5 - 1.0 Nm  
 Page 230

**Planetary Gearhead**  
 Ø222 mm  
 0.5 - 2.0 Nm  
 Page 231

**Spur Gearhead**  
 Ø224 mm  
 0.1 Nm  
 Page 234

**Recommended Electronics:**  
 LSC 30/2  
 Notes

**Encoder MR**  
 32 CPT,  
 2 / 3 channels  
 Page 255

**Encoder MR**  
 128 / 256 / 512 CPT,  
 2 / 3 channels  
 Page 256

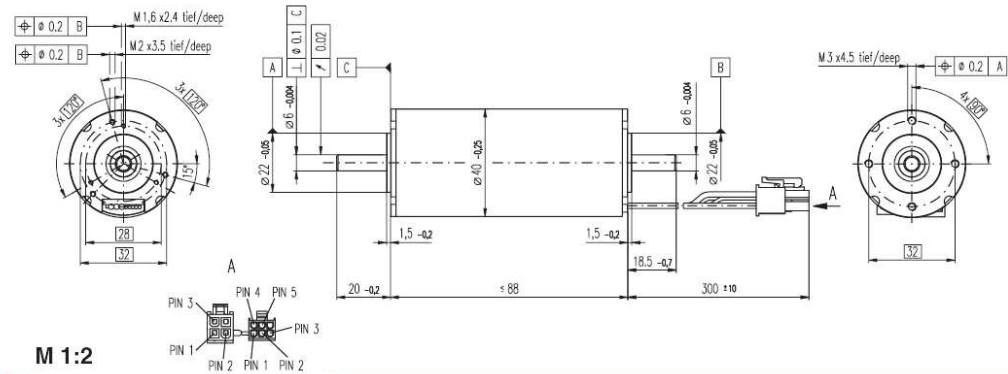
**Encoder Enc**  
 22 mm  
 100 CPT, 2 channels  
 Page 261

**Encoder MEnc**  
 Ø13 mm  
 16 CPT, 2 channels  
 Page 270

## Příloha 3

### Katalogový list motoru EC-max.

#### EC-max 40 Ø40 mm, brushless, 120 Watt



M 1:2

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

#### Order Number

283870 283871 283872 283873

#### Motor Data

##### Values at nominal voltage

		283870	283871	283872	283873
1	Nominal voltage	V	48.0	48.0	48.0
2	No load speed	rpm	10100	7240	4720
3	No load current	mA	348	202	105
4	Nominal speed	rpm	9280	6290	3770
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	164	183	203
6	Nominal current (max. continuous current)	A	3.95	3.08	2.19
7	Stall torque	mNm	2090	1490	1050
8	Starting current	A	46.7	23.7	10.9
9	Max. efficiency	%	84	83	82
<b>Characteristics</b>					
10	Terminal resistance phase to phase	Ω	1.03	2.02	4.40
11	Terminal inductance phase to phase	mH	0.204	0.400	0.937
12	Torque constant	mNm / A	44.8	62.8	96.1
13	Speed constant	rpm / V	213	152	99.4
14	Speed / torque gradient	rpm / mNm	4.89	4.90	4.55
15	Mechanical time constant	ms	5.17	5.19	4.81
16	Rotor inertia	gcm <sup>2</sup>	101	101	101

#### Specifications

- Thermal data**
- 17 Thermal resistance housing-ambient 3.45 K / W
  - 18 Thermal resistance winding-housing 0.29 K / W
  - 19 Thermal time constant winding 3.87 s
  - 20 Thermal time constant motor 1140 s
  - 21 Ambient temperature -20 ... +100°C
  - 22 Max. permissible winding temperature +155°C
- Mechanical data (preloaded ball bearings)**
- 23 Max permissible speed 12000 rpm
  - 24 Axial play at axial load < 10 N 0 mm
  - 25 Radial play > 10 N 0.14 mm
  - 26 Max. axial load (dynamic) 9 N
  - 27 Max. force for press fits (static) 170 N
  - 28 Max. radial loading, 5 mm from flange 5000 N

#### Other specifications

- 29 Number of pole pairs 1
- 30 Number of phases 3
- 31 Weight of motor 650 g

Values listed in the table are nominal.

#### Connection Motor (Cable AWG 20)

- red Motor winding 1 Pin 1
- black Motor winding 2 Pin 2
- white Motor winding 3 Pin 3
- N.C. Pin 4

#### Stecker Artikelnummer

Molex 39-01-2040

#### Connection Sensoren (Cable AWG 26)

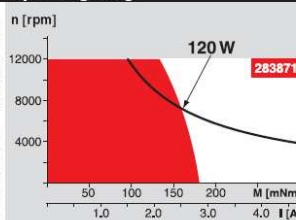
- yellow Hall sensor 1 Pin 1
- brown Hall sensor 2 Pin 2
- grey Hall sensor 3 Pin 3
- blue GND Pin 4
- green V<sub>DD</sub> 4.5 ... 24 VDC Pin 5
- N.C. Pin 6

#### Stecker Artikelnummer

Molex 430-25-0600

Wiring diagram for Hall sensors see page 27

#### Operating Range

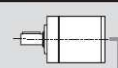


#### Comments

- Continuous operation**  
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.  
= Thermal limit.
- Short term operation**  
The motor may be briefly overloaded (recurring).
- Assigned power rating**

#### maxon Modular System

Planetary Gearhead  
Ø52 mm  
4 - 30 Nm  
Page 248



Recommended Electronics:  
DECS 50/5 Page 284  
DECV 50/5 285  
DEC 70/10 286  
DES 50/5 287  
DES 70/10 287  
EPOS 70/10 295  
EPOS2 50/5 295

Notes 20

#### Overview on page 16 - 21

Encoder MR  
256 - 1024 CPT,  
3 channels  
Page 259

Encoder HEDL 5540  
500 CPT,  
3 channels  
Page 266

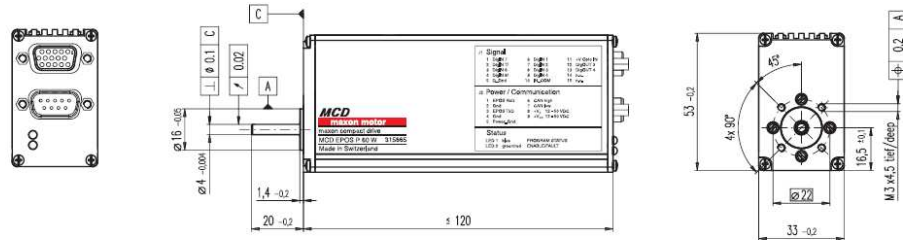
Brake AB 28  
Ø28 mm  
24 VDC, 0.4 Nm  
Page 307

## Příloha 4

### Katalogový list jednotky MCD.

#### MCD EPOS and EPOS P 60 W Compact Drive

DIGITAL CANopen  
RS232 GUI



M 1:2

##### Motor Data

Nominal torque (Max. continuous torque)	54 mNm ( $T_u=25^\circ\text{C}$ , 5000 rpm)
Max. torque	218 mNm
Max. permissible speed (restricted by econdor)	12000 rpm
Max. efficiency	70 %
Torque constant	24.3 mNm / A
Speed constant	393 rpm / V
Speed / torque gradient	20.6 rpm / mNm
Rotor inertia	22.9 gcm <sup>2</sup>
Axial play at axial load	< 6 N
(Preloaded ball bearings)	> 6 N
Radial play	preloaded
Max. axial load (dynamic)	5.5 N
Max. force for press fits (static)	100 N
Max. radial loading, 5 mm from flange	25 N

##### Pin layout

###### Connector J1: Signal

D Sub connector High Density 15 poles (female)

1 DigIN 7	6 DigIN 1	11 +V Opto IN
2 DigIN 7/	7 DigIN 2	12 DigOUT 3
3 DigIN 8	8 DigIN 3	13 DigOUT 4
4 DigIN 8/	9 DigIN 4	14 not connected
5 D_Gnd	10 IN_COM	15 not connected

###### Connector J2: Power/Communication

D Sub connector 9 poles (male)

1 EPOS RxD	4 Gnd	7 CAN low
2 Gnd	5 Power_Gnd	8 +V <sub>c</sub> 12-50 VDC
3 EPOS TxD	6 CAN high	9 +V <sub>cc</sub> 12-50 VDC

##### Ambient temperature / Humidity range

Protection class	IP42 (optional IP54)
Operating	-20 ... +85°C power derating 1.4%/K from $T_u = 25^\circ\text{C}$
Storage	-40 ... +85°C
Non condensing	20 ... 80 %
Max. case temperature	< 100°C

##### Mechanical data

Weight	approx. 495 g
Dimensions (L x W x H)	120x33x53 mm
Mounting plate	four M3x4.5 threaded holes

##### Options

- Encoder MR with 500 counts per turn (account of the positioning precision 15000 rpm)
- Protection to IP54 (assembled and sealed connection cable)

##### Electrical data

Power supply voltage +V <sub>cc</sub> (Ripple < 10%)	+12....+50 VDC
Logic supply voltage +V <sub>c</sub> (Ripple < 10%)	(Optional) +12....+50 VDC
Max. output voltage	0.9 · V <sub>cc</sub>
Max. output current I <sub>max</sub>	9 A
Continuous output current I <sub>cont</sub>	2.6 A ( $T_u = 25^\circ\text{C}$ , 5000 rpm)
Switching frequency	50 kHz

##### Controller

Sample rate PI-current controller	10 kHz
Sample rate PI-speed controller	1 kHz
Sample rate PID-positioning controller	1 kHz
Position resolution	0.09°
Position accuracy	± 1°
Position reproducibility	± 0.09°
Encoder	1000 Imp./3 Channels

##### Inputs

4 digital inputs (opto-coupled)	+9...+24 VDC
2 digital inputs (differential)	EIA-standard RS-422

##### Outputs

2 digital outputs (opto-coupled)	max. +24 VDC (I <sub>L</sub> < 350 mA)
----------------------------------	--

##### Interfaces

RS-232 (EIA-standard RS-232)	Max. 115 200 bit/s
CAN (high-speed; ISO 11898 compatible)	Max. 1 MBit/s
CAN ID	LSS CiA DSP-305

##### Protective functions

Current Limit (adjustable), Under-/over-voltage limitation, Temperature monitoring
--

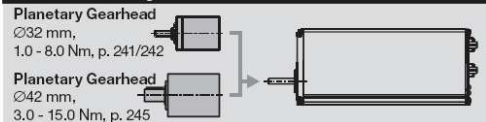
##### LED indicator

Bi-colour LED	green = Enable, red = Fault blink pattern = Operating status
Blue LED (only master version)	program status

##### Performance features MCD EPOS P

32 bit host processor, 60 MHz
512 KB memory
Typical 2.5 ms / 5000 lines AWL
512 Byte non-volatile memory
Digital motion control signal processor

##### maxon modular system



##### Order numbers

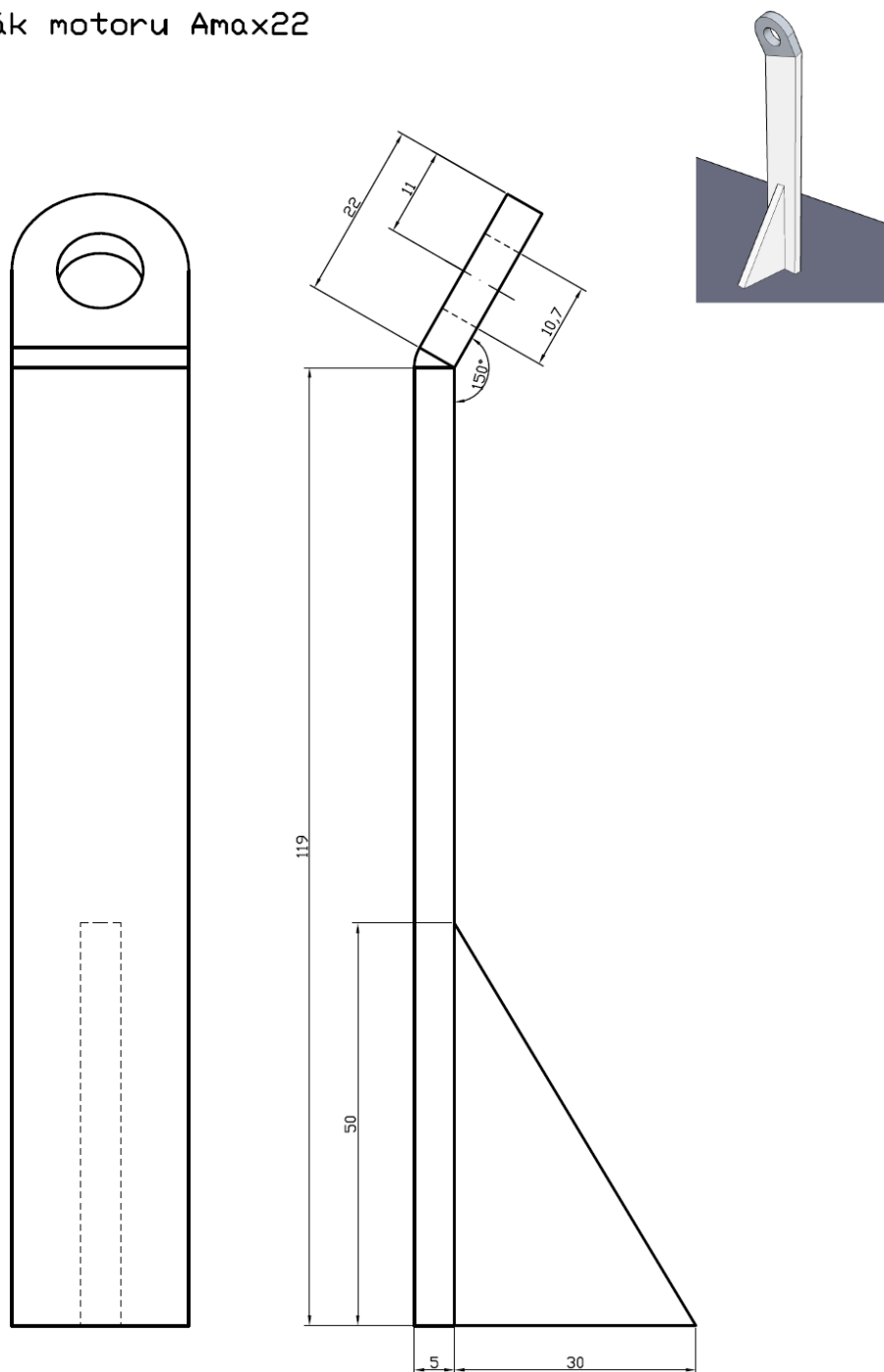
326343	MCD EPOS 60 W
315665	MCD EPOS P 60 W

## Příloha 5

Technická dokumentace – držák motoru A-max.

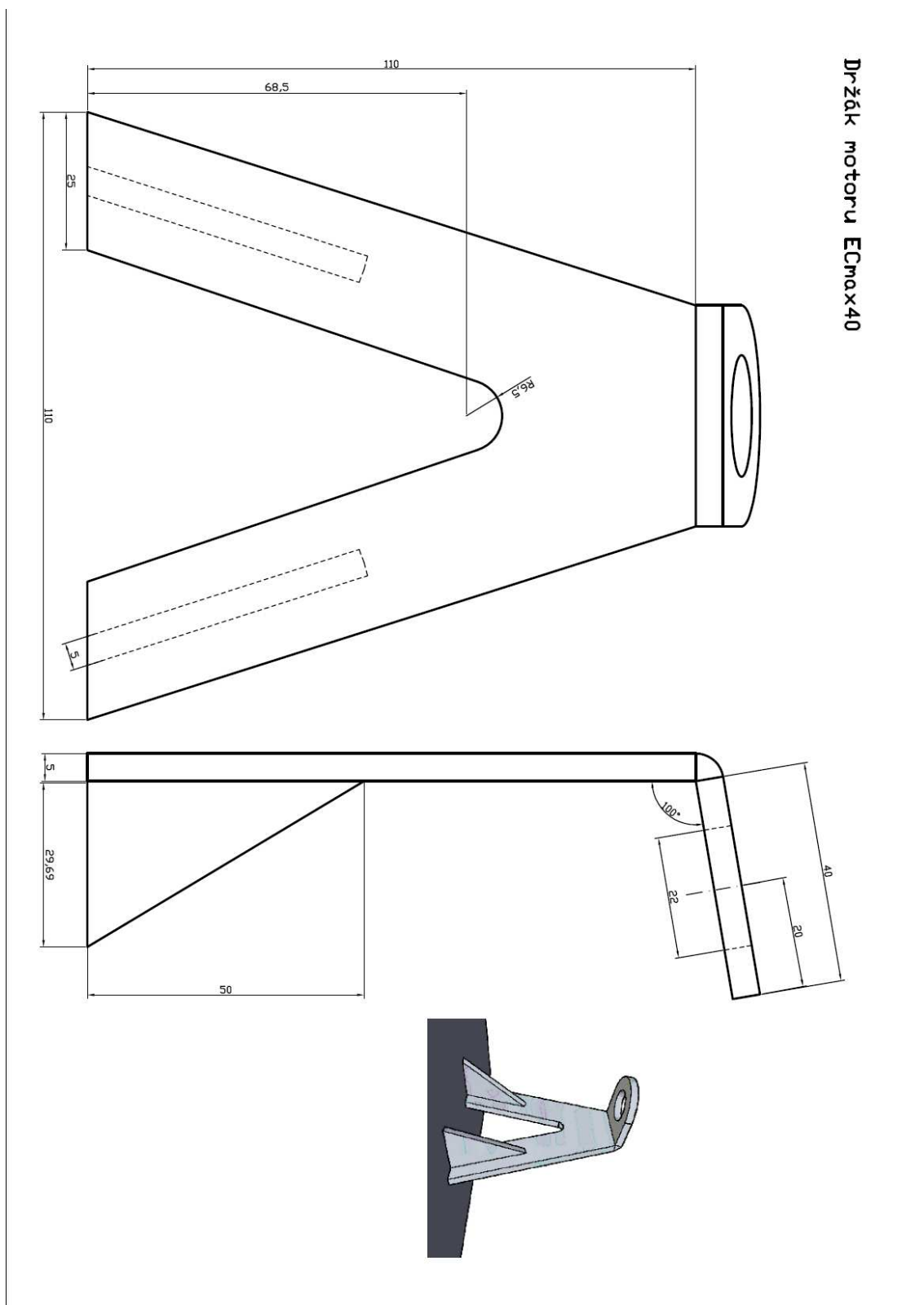
---

Držák motoru Amax22



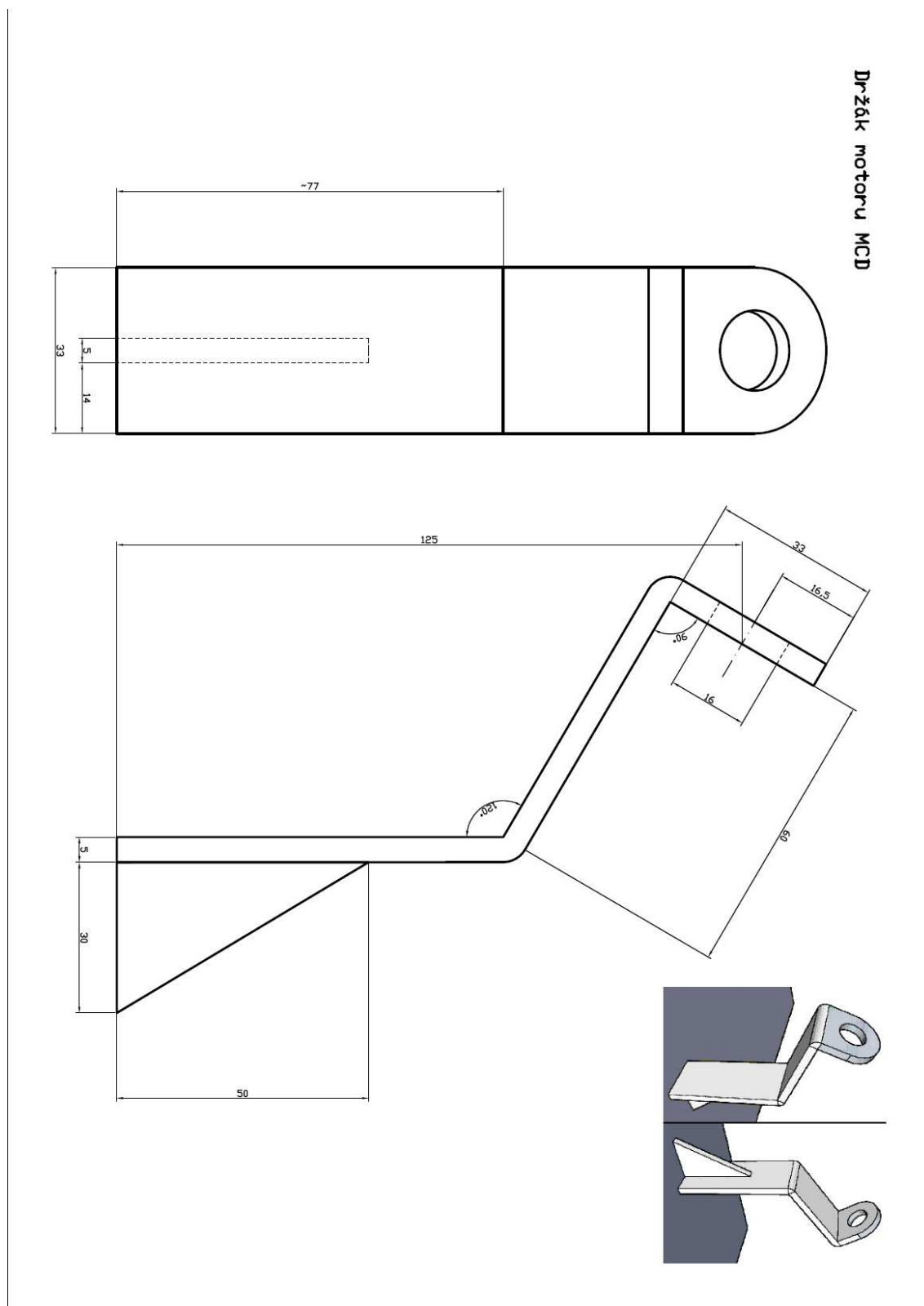
## Příloha 6

Technická dokumentace – držák motoru EC-max.



## Příloha 7

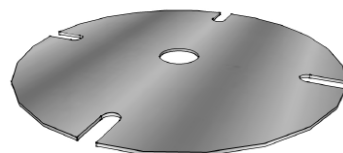
Technická dokumentace – držák jednotky MCD.



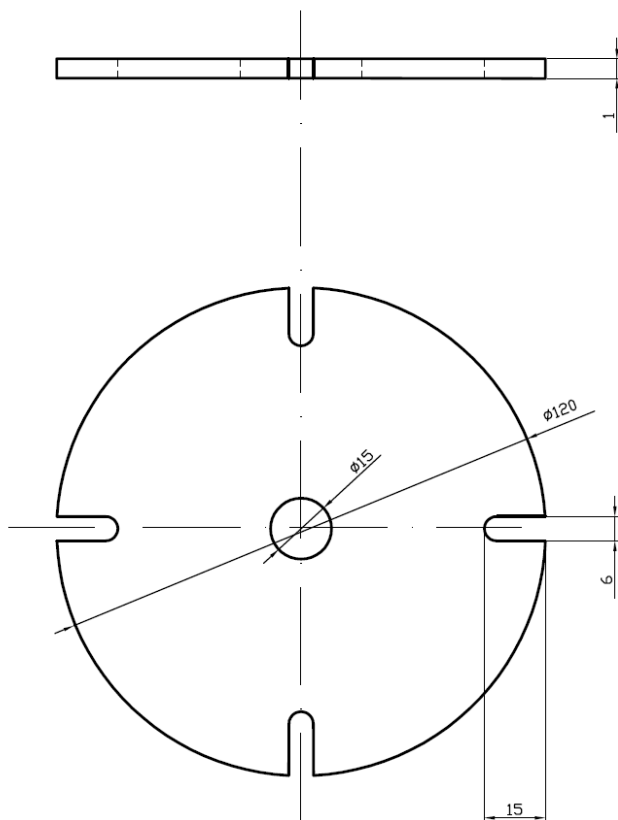
## Příloha 8

Technická dokumentace – Nerezový disk pro EC-max.

NEREZOVÝ DISK PRO E-max 40



Nerezový plech tl. 1mm



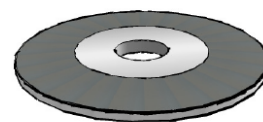


## Příloha 9

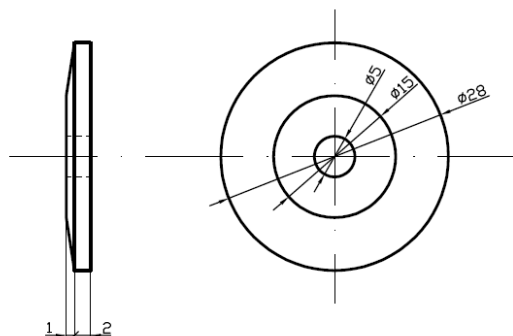
Technická dokumentace – Nové díly unášečů.

### UNAŠEČE - 1. ČÁST

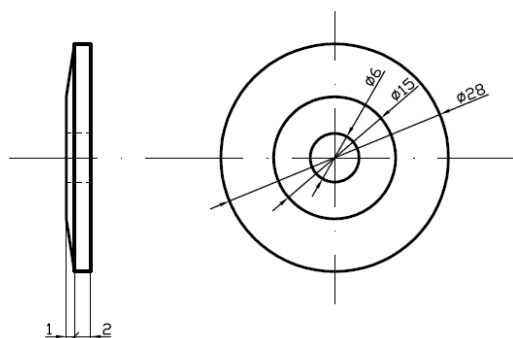
Materiál: Dural (hliník)



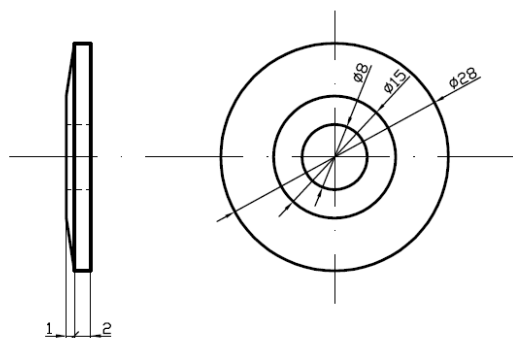
A) Unášec pro hřídel 2mm  
(otvor 5mm)



B) Unášec pro hřídel 4mm  
(otvor 6mm)



C) Unášec pro hřídel 6mm  
(otvor 8mm)

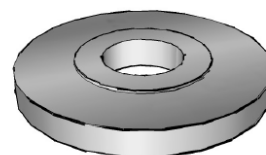


## Příloha 10

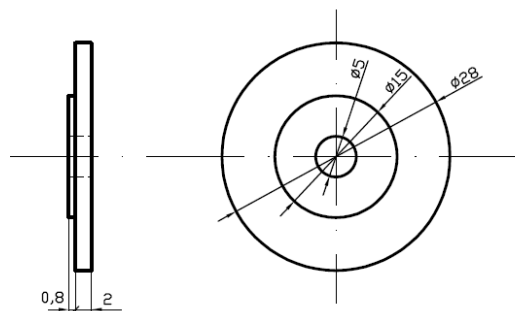
Technická dokumentace – Nové díly unášečů 2.

### UNAŠEČE – 2. ČÁST

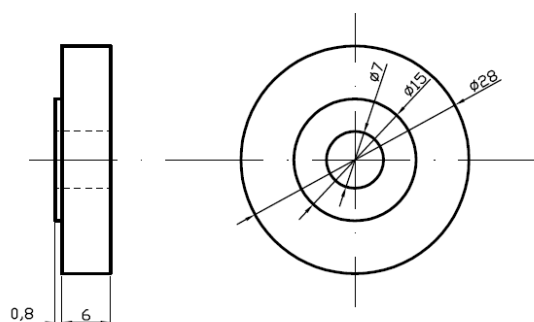
Materiál: Dural (hliník)



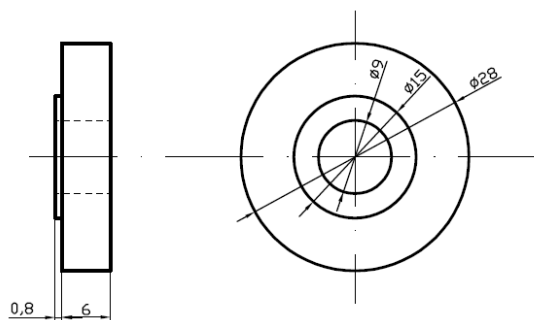
A) Unášeč pro hřídel 2mm  
(otvor 5mm)



B) Unášeč pro hřídel 4mm  
(otvor 7mm)



C) Unášeče pro hřídel 6mm  
(otvor 9mm)



## Příloha 11

Fotografie z výstavy Ampér 2010

